

高速炉によるTRU消滅処理に関する研究（Ⅱ）
TRU消滅超長寿命炉心及びTRU断面積不確かさの影響に関する検討

1992年12月

動力炉・核燃料開発事業団
大洗工学センター

複製又はこの資料の入手については、下記にお問い合わせください。

〒311-13 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002

動力炉・核燃料開発事業団

大洗工学センター システム開発推進部・技術管理室

Enquires about copyright and reproduction should be addressed to: Technology Management Section O-arai Engineering Center, Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation 4002 Narita-cho, O-arai-machi, Higashi-Ibaraki, Ibaraki-ken, 311-13, Japan

動力炉・核燃料開発事業団 (Power Reactor and Nuclear Fuel Development Corporation)

高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(II)

TRU消滅超長寿命炉心及びTRU断面積不確かさの影響に関する検討

山岡光明*, 若林利男**

要 旨

高レベル廃棄物に含まれるTRU元素(Np,Am,Cm)は長期にわたり放射能を有しているが、これを短期間に消滅できればその管理は大幅に容易なものとなる。本研究では高速炉によるTRU消滅処理に関して検討を実施した。概要を以下に示す。

1. TRU消滅超長寿命炉心の検討

TRUを装荷したFBR炉心は運転サイクル期間を延ばす高いポテンシャルを持っている。この特性を生かしてプラント寿命中燃料交換なしで運転しつつ、TRUを効率的に消滅することを目的としたTRU消滅超長寿命炉心の検討を行った。出力を30万KWeとし、炉心構成の最適化・核熱特性検討を行った結果、最適化炉心では燃焼反応度変化が34年運転で $2.5\% \Delta k/kk'$ と非常に小さくなった。また、出力変動も小さくできたため熱的制限を満足した。TRU消滅量は寿命34年で約5300Kgで、100万KWe軽水炉約6基が寿命中に発生させるTRUに相当する。TRU装荷によりドップラー係数(絶対値)がかなり小さい。今後は安全性・制御性など炉心動特性への影響について検討する必要がある。

2. TRU断面積の不確かさの影響検討

現状ではTRU断面積の不確かさが大きいことに鑑み、この不確かさが主要炉心特性に及ぼす影響を調べた。ここでは、上記のTRU消滅超長寿命炉心と5%TRU装荷大型炉心を対象として断面積の感度解析を実施した。さらに、簡易的手法により炉心特性の不確かさを評価した。この結果をもとに、不確かさへの影響が大きく精度を向上すべき断面積を抽出した。

* 技術開発部プラント工学室

** 技術開発部

Study on TRU Transmutation by LMFBRs (II)

Study on Super Long Life Core for TRU Transmutation and Influence of Uncertainties of TRU Cross Sections

M. Yamaoka* and T. Wakabayashi**

Abstract

TRU nuclides (Np, Am, and Cm) contained in the high level waste have extremely long-term radioactivity. They would be managed much more easily if transmuted in a short period. The present study deals with TRU transmutation by Fast Breeder Reactors (FBRs). The results are summarized below.

(1) Study on a 300MWe Super Long Life Core for TRU Transmutation

An FBR core loaded with TRU has a large potentiality of extending operation cycle length. Making use of the potentiality, a super long life FBR core loaded with TRU was studied aiming at continuous operation without refueling during plant life and efficient reduction of TRU nuclides. Core parameters were optimized with the electric power of 300MWe and analyses of nuclear and thermal characteristics were carried out. As a result, the burnup reactivity change of the optimized core for 34 years is very small ($2.5\% \Delta k/k$). The power swing is also small, which resulted in satisfaction of the thermal design criteria. The amount of TRU transmuted during lifetime is about 5300Kg, which is equal to that 6 LWRs of 1000MWe produce during their lifetime. The Doppler coefficient (absolute value) is rather small because of TRU loading. Further study is needed on core kinetics from the view point of core safety and control.

(2) Study on influence of uncertainties of TRU cross sections

There are large uncertainties in TRU cross sections because of lack of experimental data. The influences of the uncertainties upon nuclear characteristics were evaluated for the super long life core and a large FBR core loaded with TRU of 5%. Sensitivity analysis on cross sections was carried out and uncertainties of nuclear characteristics were roughly evaluated. Based on the results, the TRU cross sections with large influences were identified.

* Plant Engineering Office, Technology Development Division, OEC

** Technology Development Division, OEC

目 次

1. はじめに	1
2. TRU消滅超長寿命炉心の検討	3
2.1 検討条件	3
2.2 パラメータサーベイ	6
2.3 炉心核熱特性の解析	23
2.4 燃料に関する検討	45
2.5 まとめと今後の課題	47
3. TRU断面積による炉心特性の不確かさの検討	49
3.1 TRU核種の断面積不確かさ	49
3.2 炉心特性に対する断面積感度の評価	52
3.3 炉心特性の不確かさの評価	70
3.4 まとめ及び精度を向上すべき断面積の抽出	80
謝辞	82
参考文献	83
付録 100万KWe大型炉心(5%TRU)の炉心仕様と炉心特性	84

表リスト

表2.1.1	プラントパラメータ
表2.1.2	TRU燃料の組成
表2.1.3	燃料仕様
表2.2.1	炉心高さに関するサーベイ結果(30年連続運転)
表2.2.2	出力密度に関するサーベイ結果(炉心高さ80cm)
表2.2.3	TRU装荷割合に関するサーベイ結果 (炉心高さ80cm、出力密度75W/cc)
表2.3.1	選定炉心の炉心仕様と主要核特性
表2.3.2	重金属物質収支
表2.3.3	制御棒価値計算値($\% \Delta \rho$)
表2.3.4	制御棒の反応度収支
表2.3.5	反応度係数計算値(二次元RZ拡散)
表2.3.6	密度係数及び形状係数(初期炉心、炉心部)
表2.3.7	出力係数、等温温度係数(初期炉心、炉心部)
表2.3.8	遅発中性子発生割合(νd)
表2.3.9	動特性パラメータ
表2.3.10	各領域流量と被覆管最高温度
表3.1.1	TRU(Np,Am,Cm)断面積誤差の推定値(1σ レベル)
表3.1.2	想定したTRU断面積の共分散マトリックス
表3.3.1	超長寿命炉心の炉心特性の不確かさ(1σ)
表3.3.2	超長寿命炉心の炉心特性の不確かさの内訳(1)
表3.3.3	超長寿命炉心の炉心特性の不確かさの内訳(2)
表3.3.4	TRU5%-1000MWe炉心の炉心特性の不確かさ(1σ)
表3.3.5	TRU5%-1000MWe炉心の炉心特性の不確かさの内訳(1)
表3.3.6	TRU5%-1000MWe炉心の炉心特性の不確かさの内訳(2)
表3.4.1	精度向上の必要な断面積

図リスト

- 図2.2.1 燃焼計算に用いた核種連鎖チェーン
- 図2.2.2 パラメータサーベイ用の炉心配置
- 図2.2.3 炉心高さサーベイ用のRZ体系
- 図2.2.4 燃焼に伴う実効増倍率の変化
(出力密度と炉心高さが前年度条件の場合)
- 図2.2.5 燃焼による実効増倍率の変化(パラメータ:炉心高さ)
- 図2.2.6 燃焼による最大出力密度の変化(パラメータ:炉心高さ)
- 図2.2.7 燃焼による領域平均出力密度の変化幅
(パラメータ:炉心高さ)
- 図2.2.8 燃焼による無限増倍率の変化
- 図2.2.9 燃焼による実効増倍率の変化(パラメータ:出力密度)
- 図2.2.10 燃焼による実効増倍率の変化(TRU装荷割合10%の場合)
- 図2.3.1 30万KWe最適化炉心の炉心配置
- 図2.3.2 30万KWe最適化炉心の水平断面図
- 図2.3.3 燃焼による実効増倍率の変化(最適化炉心)
- 図2.3.4 集合体出力分布の燃焼変化
- 図2.3.5 集合体出力分布の燃焼変化(制御棒を含む集合体列)
- 図2.3.6 Pu各同位元素の炉心平均原子数密度の変化
- 図2.3.7 Np及びAm各同位元素の炉心平均原子数密度の変化
- 図2.3.8 Cm各同位元素の炉心平均原子数密度の変化
- 図2.3.9 炉心部中性子スペクトル
- 図2.3.10 集合体流量配分領域
- 図3.2.1 実効増倍率(初期)に対するTRU断面積の感度係数
(超長寿命炉心)
- 図3.2.2 燃焼反応度変化量(初期から中期)に対するTRU断面積の
感度係数(超長寿命炉心)

- 図3.2.3 燃焼反応度変化量(初期から末期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)
- 図3.2.4 内側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)
- 図3.2.5 外側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)
- 図3.2.6 TRU消滅量(寿命中、増大を正とする)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)
- 図3.2.7 Naボイド反応度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)
- 図3.2.8 実効増倍率(初期)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)
- 図3.2.9 燃焼反応度変化量(1サイクル)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)
- 図3.2.10 内側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)
- 図3.2.11 外側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)
- 図3.2.12 TRU消滅量(1サイクル、増大を正とする)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)
- 図3.2.13 ドップラー係数(初期)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)
- 図3.2.14 Naボイド反応度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(TRU5%-1000MWe炉心)

1. はじめに

原子炉からの使用済み燃料に含まれるTRU元素(ここではNp,Am,Cm)は高レベル廃棄物としてきわめて長期にわたり放射能を有する(1)。そのため、近年、TRU元素の消滅処理が注目されており、わが国でもオメガ計画により、種々の方策によるTRU消滅処理や群分離の方法が研究されている。高速炉はその硬いスペクトルによりこれらTRU元素を短期間に消滅させるのに適していると考えられる(2)。

プラント工学室では、FBRによるTRU消滅のフィージビリティを検討している(3),(4),(5)。炉心としては、従来型大型炉心の他に超長寿命炉心を検討している。超長寿命炉心はプラント寿命中燃料交換なしで連続運転することにより、燃料サイクルコストの低減・燃料取扱い系の簡素化などをめざしたものである(6)。超長寿命炉心には、開発中の高燃焼度用材料使用を前提として、約30年で平均燃焼度を20万MWd/tにするため及び燃焼反応度変化を抑制するために、出力密度を従来炉心の約3~4分の1に低減しているという特徴がある。

しかしながら、従来のMOX燃料を用いた場合には、炉心体積が従来型100万KWe炉心の約4倍であっても反応度変化は10%以上にもなり、反応度制御が困難であることがわかっている(5)。

TRU消滅超長寿命炉心は、TRU装荷炉心が有する運転サイクル延長に対する高いポテンシャル(3)に着目し、これをプラント寿命中燃料交換なしでの連続運転に生かすものであり、かつ、TRUを炉内に閉じ込めながら消滅するものである。これまでのTRU消滅超長寿命炉心に関する研究(4),(5)では、100万KWe及び30万KWe級炉心の検討を行った。両炉心ともに炉心寸法(炉心径と高さ)は固定した条件で、燃料体積比とTRU装荷割合のみサーベイを行った。また、詳しい核熱特性解析は100万KWe級炉心についてのみ行った。その結果、従来のMOX燃料の場合より、大幅に燃焼反応度変化を低下できるだけでなく、最適な炉内装荷法により出力変動をも抑制できることがわかった。但し、両炉心とも出力密度は従来のMOX燃料を用いた超長寿命炉心と同程度としたため、その体積は同一出力の従来炉の4倍から5倍であり、また、TRU装荷量も100万KWe炉では約17トンに達する。

本研究では、炉心サイズを従来の大型炉並みに抑えられ、TRU装荷量も低減できる30万KWe級に焦点を絞り、炉心寸法の見直し(コンパクト化)、Naボイド反応度低減を目的とした炉心仕様検討を行うこととする。また、三次元解析も含めた詳細な炉心核熱特性の解析を行い、その成立性を検討する。ここで、TRU燃料はこれまでと同様に酸化物としてMOX燃料と混合されるとした。

さらに、本研究では現状のTRU断面積の不確かさが大きいことに鑑み、これが主要炉心特性に及ぼす影響を調べた。対象とした炉心はTRU消滅超長寿命

炉心に加えて、TRUを5%装荷した従来型100万KWe炉心とした。ここではまず、各TRU核種の断面積の主要特性への感度をエネルギー群、反応ごとに算出した。次に文献等により調査した各断面積の不確かさをを用いて主要特性に及ぼす影響を評価した。これをもとにして、不確かさへの影響が大きく精度を向上すべき核種と反応を抽出した。

本報告書において用いた主な炉心計算結果は別途解析報告書(7)にまとめられているが、一部の計算については本報告書を作成する際に追加した。

2. TRU消滅超長寿命炉心の検討

2.1 検討条件

(1)プラントパラメータ

プラントパラメータを表2.1.1に示す。燃料交換なしで運転する炉心の実質的な寿命として約30年とした。これは実効値である。

(2)TRU燃料の組成

表2.1.2に示す軽水炉から取り出したものとした。

(3)TRU装荷割合

TRU装荷による炉心特性や燃料物性への影響の低減やTRU装荷絶対量の抑制の観点から、平均で20%程度に抑えることとした。

(4)燃料仕様

前年度の検討結果(5)より、燃焼による反応度変化を低減するために燃料体積比の増大は非常に有効であることが示された。そこで、できるだけ燃料体積比の高い燃料仕様を用いることを前提で炉心寸法を最適化することとした。燃料仕様は前年度の検討(5)での選定仕様と同じで、燃料体積比約50%となる表2.1.3の燃料仕様に固定することとした。特徴は高燃料体積比のために12mmの超太径ピン、0.8mmの細径ワイヤとしていることである。この仕様では、炉心体積を従来約3分の1程度に低減した場合に(平均出力密度約75W/cc)取り出し平均燃焼度が約20万MWd/tとなる。この場合、被覆管はODS鋼のような低スエリング・高強度材料の開発を前提とすることとなる。ワイヤ径が細くかなり密な燃料配置となっているが、集合体流量が従来炉心の約3分の1程度に減少するとすると、バンドル圧損はこの仕様でもかなり低くなると予想される。

(5)出力密度

前年度に検討した30万KWe炉心(5)では燃料体積比は表2.1.3に示す仕様を用い、出力密度は約55W/ccとかなり低くした。その結果、実効40年の炉心寿命に対して平均燃焼度は17万MWd/tであった。

本研究では炉心コンパクト化を狙って、平均出力密度を上げることとする。上記のように平均出力密度を約75W/cc程度とすると、炉心寿命実効30年で平均燃焼度20万MWd/tとなる。これは約30%の出力密度の増大である。

表2.1.1 プラントパラメータ

項目	値
熱出力/電気出力	755/300(MW)
原子炉出入口温度	530/375 (°C)
プラント寿命	実効約30年
平均燃焼度	約20万MWd/t

表 2.1.2 TRU燃料の組成 *

Nuclide	Weight Fraction (%)
Np-237	49.14
Am-241	29.98
Am-242m	0.08
Am-243	15.50
Cm-243	0.05
Cm-244	4.99
Cm-245	0.26

* Discharged from PWR (35GWD/T) and Cooled for 5 Years Before Reprocessing

表 2.1.3 燃料仕様

	値
燃料ピン径	12.2mm
被覆間管肉厚	0.7mm
ペレット径	10.6mm
ペレット焼結密度	90.9%
ペレットスミヤ密度	87.6%
ワイヤ径	0.8mm
ワイヤ巻ピッチ	200mm
ポロシテイ/リング	0.096mm
集合体ピン本数	217
ダクト内対面間距離	194.0mm
ダクト肉厚	4.0mm
ダクト外対面間距離	202.0mm
集合体間ギャップ	6.0mm
集合体配列ピッチ	208.0mm

2.2 パラメータサーベイ

(1) 計算手法

パラメータサーベイは、二次元RZ燃焼計算によるものとした。核断面積はJENDL-3を70群定数化したJFS3-JENDL3/91-02(8)をもとに、さらに炉心内各領域のスペクトルで7群まで縮約したものをを用いた。燃焼計算における核種連鎖チェーンを図2.2.1に示す。

Pu富化度の設定は、寿命中の実効増倍率が1.002以上で、かつ、内側炉心と外側炉心の出力ピークがほぼ一致することとした。

(2) サーベイケースの設定

サーベイケースは以下のとおり設定した。これまでの研究(5)で検討した30万KWe炉心の炉心配置を図2.2.2に示す。この炉心は従来の100万KWe炉心と同一炉心配置(炉心高さは100cm)で燃料仕様のみ表2.1.3としたものであった。炉心径は約425cm、平均出力密度は約55W/ccであった。本年度は平均出力密度を75W/ccと上げるが、炉心高さやTRU装荷割合を最適化することとする。

炉心高さのサーベイでは出力密度75W/cc一定で炉心高さを変化させる。サーベイしたケースの炉心寸法を図2.2.3に示す。サーベイケースは炉心高さ60cmから150cmまでの4ケースである。尚、ここでのRZモデルは図2.2.2の炉心(出力密度55W/cc)をRZモデル化したものをベースに、燃料体積比は同一とし、便宜的に径方向寸法を75W/ccとなるように調節したモデルとした。

図2.2.4に示したのはこれまでの研究(5)の条件でのTRU装荷割合と燃焼による反応度変化の関係である。本年度の条件では、出力密度が30%大きくなり燃焼速度が早くなる。おおよそ、本図での40年が今回の条件での30年に対応すると考えられる。そのように考えると今回の条件では炉心平均約20%TRU装荷がほぼ最適である。そこで、TRU装荷割合は幅広いサーベイは行わず、まずは炉心平均約20%とし炉心高さのサーベイを行い、結果によってTRU装荷割合を見直すこととした。また、内外炉心の装荷割合の比はこれまでの研究(5)の最適化炉心において出力変動を抑制できる1:2の割合でスタートするが、最適であることを確認するためのサーベイを行う。

ここでは、上記サーベイをもとに仕様を決めるが、平均出力密度をさらに上げて100W/ccとする場合、TRU装荷割合を低減する場合についても補足的に検討し、仕様選定の一助とする。

(3) 炉心高さのサーベイ

サーベイ結果のまとめを表2.2.1に示す。各炉心高さに対する実効増倍率の燃焼変化、最大出力密度の燃焼変化、径方向領域ごとの平均出力密度の燃焼変化をそれぞれ図2.2.5、図2.2.6、図2.2.7に示す。

(i)燃焼による反応度変化

図2.2.5に示されるように、炉心高さ100cmでは燃焼とともに反応度が増大し、燃焼期間15年から20年にかけて最大反応度約4.5%となった後、反応度は減少し30年後の反応度は約2%となっている。これに対して、炉心高さを低減していくと燃焼による初期の反応度上昇率が小さくなり、30年間の反応度変化が小さくなる。但し、60cm高さの場合、燃焼初期の実効増倍率を1.002とすると寿命は20数年となってしまふ。この場合、燃焼末期に実効増倍率を1.002とするようにPu富化度を上げると一方的に反応度は低下する傾向となり、最大反応度は初期の約4.5%となる。炉心高さを150cmまで高くすると初期の反応度変化が大きくなり、最大反応度も大きくなる。

以上の傾向は、TRU装荷割合を炉心平均約22%に固定している状況のもとで、炉心高さが高いほどPu富化度が小さくでき内部転換比が高くなることによる。そして、炉心高さ150cmでは初期の内部転換比が高すぎ、また、炉心高さ60cmでは逆にこれが十分に大きくないことによりこのような結果となっている。従って、TRU装荷割合を変えれば、各炉心高さについて反応度変化を小さくできると予想される。図2.2.8はTRU装荷割合をパラメータとした場合のPu富化度16%及び19.6%の炉心組成の30年間の無限増倍率の変化である。これは無限媒質において出力密度を約75W/ccとして計算したもので、実際の二次元体系での計算結果ではない。しかしながら、無限増倍率は体系からのものにはあまり敏感ではないので、二次元体系を組んで燃焼計算をした場合とそれほど大きな差はない。この結果から以下のことがいえる。

- TRU装荷により初期の反応度を抑えて反応度変化を少なくすることができるが、TRU装荷割合には最適値がある。
- この最適値は、Pu富化度が高いほど大きい。即ち、Pu富化度が高いほどPu+Uの系の転換比が小さいため、TRUを多くして、その働き(高転換)を大きくする必要がある。

以上のことから、炉心高さ100cm,150cmのケースではもう少し小さいTRU装荷割合により反応度変化を抑えられると考えられる。尚、図2.2.8の結果は同一炉心内でのTRU装荷割合を、外側炉心で大きくする方が内外炉心ともに無限増倍率変化を小さくする、即ち出力変動を抑制できることをも示している。図2.2.6での二種類のPu富化度は炉心高さ80cmの場合のPu富化度であり、TRU装荷割合を内外で15%/30%とすることにより二つの領

域の反応度変化を等しくできる、即ち、出力変動を抑制できることが示されている。

(ii)最大出力密度と出力変動

(i)で述べたとおり炉心高さ80cmの場合は出力変動及び最大出力密度ともに小さいことが図2.2.6及び2.2.7からわかる。炉心高さ60cmの場合も同程度である。図2.2.7において最大出力密度のグラフがなめらかな連続線でないのはピーク位置が変化しているためである。

炉心高さ100cm,150cmのケースで最大出力密度が高いのは軸方向ピーキング係数が悪化しているためと、出力変動が大きくある時点では大きく径方向の平坦性が乱されるのである。これらのケースで出力変動が大きいのは、さきにも述べたとおりTRU装荷割合が最適でなく、最適値からのずれも内外炉心で異なるためである。

(iii)その他の特性

表2.2.1に増殖比、出力密度、燃焼度、高速中性子フルエンス等を示す。取り出し平均燃焼度は各炉心とも18万~19万MWd/tであるが、高速中性子フルエンスについては炉心高さが高いほど大きい。これは炉心高さが高いほど軸方向ピーキングが大きいことと内側炉心のPu富化度が低いことによる。

(iv)最適な炉心高さの選定

以上のサーベイ結果からは、約30年の寿命を確保できることを前提に、できるだけ反応度変化と出力変動が小さいこと、炉心径は小さい方が望ましいがTRU装荷によるNaボイド反応度増大を抑制するには炉心高さが低い方がよいこと、高速中性子フルエンス抑制の観点からはあまり炉心高さが高いことは避けるべきこと等を考慮し、これらの要求をバランスよく満足する炉心高さとして80cmが適切と判断した。また、暫定的に設定したTRU装荷割合は炉心平均値・内外炉心の比ともほぼ最適なものと判断される。

尚、サーベイした炉心高さ80cm以外のケースではTRU装荷割合が最適ではなく、これを最適化することでさらに良いケースが生まれる可能性もあったが、炉心高さ80cmのケースでかなり良い特性が得られたため、これ以上のサーベイは実施しなかった。

(4)平均出力密度の効果

さらなるコンパクト化の可能性を検討するため、上記選定炉心において平均出力密度として基準炉心の75W/ccから大きくし、100W/ccとした場合について影響を検討した。炉心高さは80cmと変えず、炉心径のみ調整して炉心モデルを作成した。

実効増倍率の変化を図2.2.9に示す。図からわかるように初期の実効増倍率を基準出力密度の場合と一致させた場合、最大反応度は同程度であるが、反応度変化が速くなるために30年後の実効増倍率は1を切り約0.98となる。この場合、寿命は約25年と短くなる。

その他の特性も含め、表2.2.2に主要特性を示す。出力密度が基準炉心より約30%大きいために燃焼度や高速フルエンスは寿命24年で基準炉心(炉心高さ80cm)並みである。

以上のように、出力密度を100W/ccまで上げた場合、炉心は約30%程度コンパクトになるが、寿命は5年程度短くなる。

以上の結果はTRU装荷割合をこれまでどおりとする場合であり、TRU装荷割合を増大させれば反応度寿命は延ばせると考えられる。但し、反応度変化は大きくなる。

(5)TRU装荷割合の効果

これまでの検討ではTRU装荷割合は炉心平均で20%強に固定していたが、TRU装荷割合が平均10%のケースを検討した。

プラント寿命中の実効増倍率の変化を図2.2.10に示す。本図のCASE1とCASE2はそれぞれ末期、初期で臨界という条件(Pu富化度)の計算であるが、後者では長期間臨界を保てず、前者では初期の余剰反応度が15%を越え反応度制御が困難になる。そこで、余剰反応度の上限が5%の条件でPu富化度を設定して計算したのがCASE3である。この場合、寿命は約22年である。このケースの炉心特性を表2.2.3に示す。最大余剰反応度が基準ケースの約2倍となっている他、寿命が短いので基準ケースより燃焼度やフルエンスが約2~3割低くなっている。

この結果より、TRU装荷割合を選定炉心より低減すると、プラント寿命30年の連続運転は困難となる。これを可能とするには、炉心高さの増大や出力密度の低減が必要となる。

(6)まとめ

以上の結果から、寿命約30年を条件に、炉心サイズのコンパクト化、反応度変化や出力変動の抑制、Naボイド反応度抑制を考慮した結果、下記の炉心仕様を選定した。

- 平均出力密度75W/cc
- 炉心高さ80cm
- 炉心平均TRU装荷割合約22%(内側炉心/外側炉心=15%/30%)

表2.2.1 炉心高さに関するサーベイ結果(30年連続運転)

	炉心高さ 60cm	炉心高さ 80cm	炉心高さ 100cm	炉心高さ 150cm
Pu富化度 (w/o)	19.37/23.38* (21.30)**	15.97/19.60 (17.72)	14.91/19.15 (16.95)	13.47/19.46 (16.35)
最大余剰反応度 (% $\Delta\rho$)	4.23	2.52	4.01	5.98
増殖比 (初期/末期)	0.855/1.176	0.967/1.183	0.972/1.168	0.984/1.142
出力密度(W/cc) 平均(初期/末期) 最大(初期/末期)	79.7/68.5 122.0/92.9	80.2/71.2 123.8/99.2	80.5/73.0 131.7/101.5	80.6/74.8 147.2/104.0
燃焼度(MWd/t) 集合体平均 ペレット最大	178000 270000	183000 266000	186000 278000	189000 300000
中性子フルエンス (高速群、nvt)	5.34×10^{23}	6.10×10^{23}	6.59×10^{23}	7.18×10^{23}

*内側炉心/外側炉心、**炉心平均

表2.2.2 出力密度に関するサーベイ結果(炉心高さ80cm)

	出力密度75W/cc、 炉心径400cm (寿命30年)	出力密度100W/cc 炉心径340cm (寿命24年)
Pu富化度 (w/o)	15.97/19.60 (17.72)	16.00/20.39 (18.11)
最大余剰反応度 (% $\Delta\rho$)	2.52	2.56
増殖比 (初期/末期)	0.967/1.183	1.009/1.178
出力密度(W/cc) 平均(初期/末期) 最大(初期/末期)	80.2/71.2 123.8/99.2	106.7/93.7 165.7/127.2
燃焼度(MWd/t) 集合体平均 ペレット最大	183000 266000	194000 276000
中性子フルエンス (高速群、nvt)	6.10×10^{23}	6.52×10^{23}

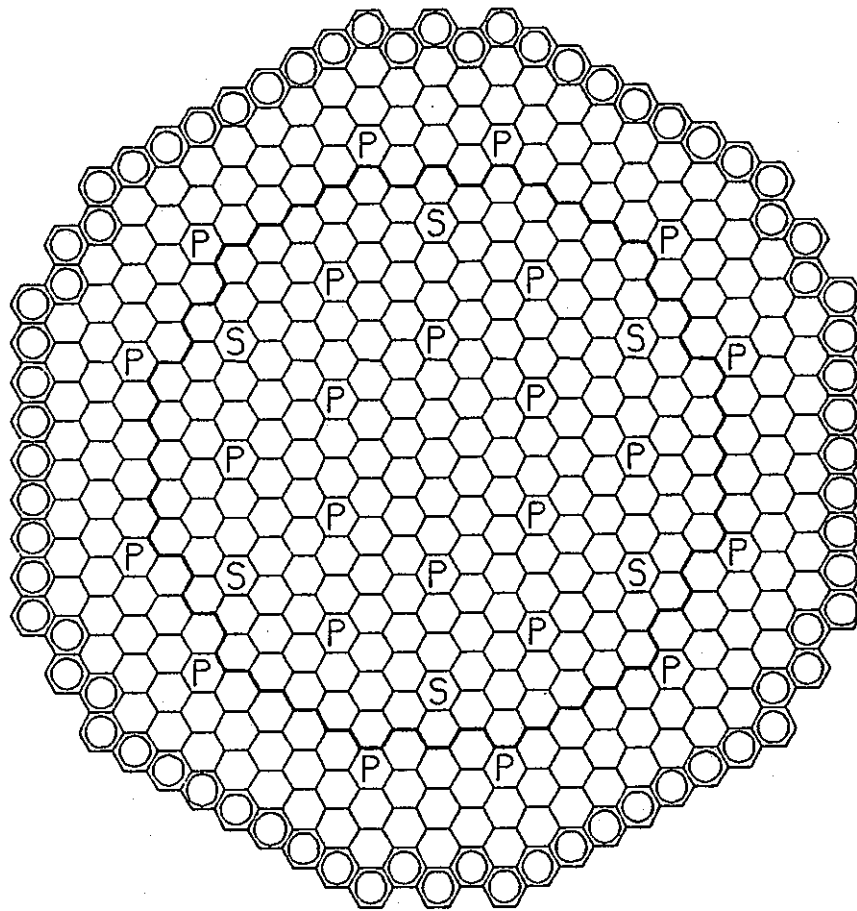
*内側炉心/外側炉心、**炉心平均

表2.2.3 TRU装荷割合に関するサーベイ結果
(炉心高さ80cm、出力密度75W/cc)

	TRU約22%装荷 (内側/外側=15/30) (寿命30年)	TRU約10%装荷* (内側/外側=7.5/15) (寿命22年)
Pu富化度 (w/o)	15.97/19.60** (17.72)***	16.15/19.67** (17.84)***
最大余剰反応度 (% $\Delta\rho$)	2.52	4.81
増殖比 (初期/末期)	0.967/1.183	0.938/1.143
出力密度(W/cc) 平均(初期/末期) 最大(初期/末期)	80.2/71.2 123.8/99.2	80.2/72.4 122.2/99.9
燃焼度(MWd/t) 集合体平均 ペレット最大	183000 266000	135000 202000
中性子フルエンス (高速群、nvt)	6.10×10^{23}	4.82×10^{23}

*最大余剰反応度を5%に抑制するように設定したケース

内側炉心/外側炉心、*炉心平均







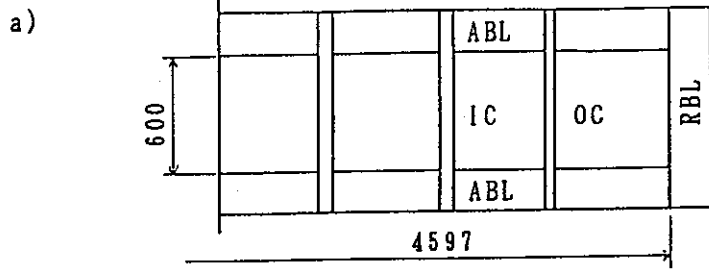
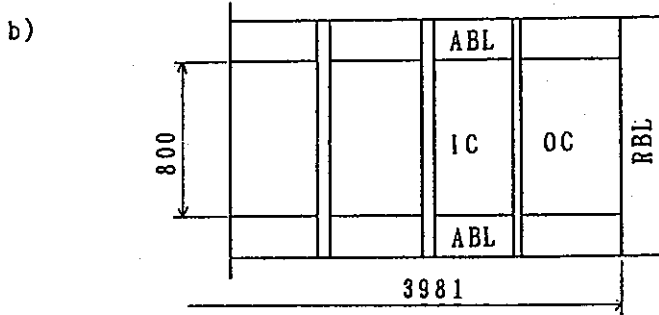
	炉心燃料集合体	349 体
	主炉停止系制御棒	24 体
	後備炉停止系制御棒	6 体
	径ブランケット燃料集合体	72 体

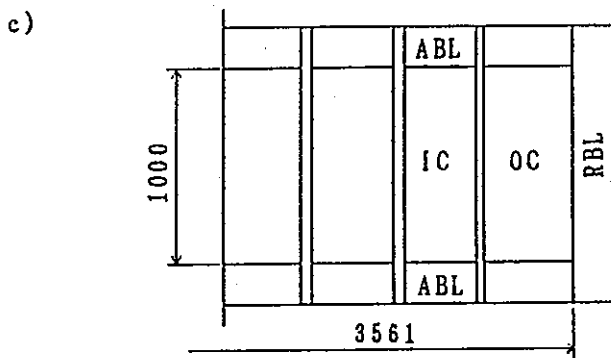
図2.2.2 パラメータサーベイ用の炉心配置



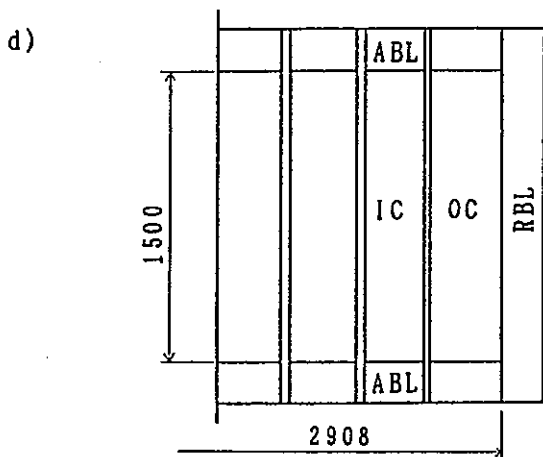
- ・ 炉心高さ 60cm
- ・ 炉心等価直径 約 460cm



- ・ 炉心高さ 80cm
- ・ 炉心等価直径 約 400cm



- ・ 炉心高さ 100cm
- ・ 炉心等価直径 約 360cm



- ・ 炉心高さ 150cm
- ・ 炉心等価直径 約 290cm

炉心部平均出力密度は約75W/ccの一定

図2.2.3 炉心高さサーベイ用のRZ体系

- 出力密度55W/cc, 炉心高さ100cm(炉心径425cm)
- 前年度の検討結果*より引用
- *PNC ZN9410 91-365 高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(I)

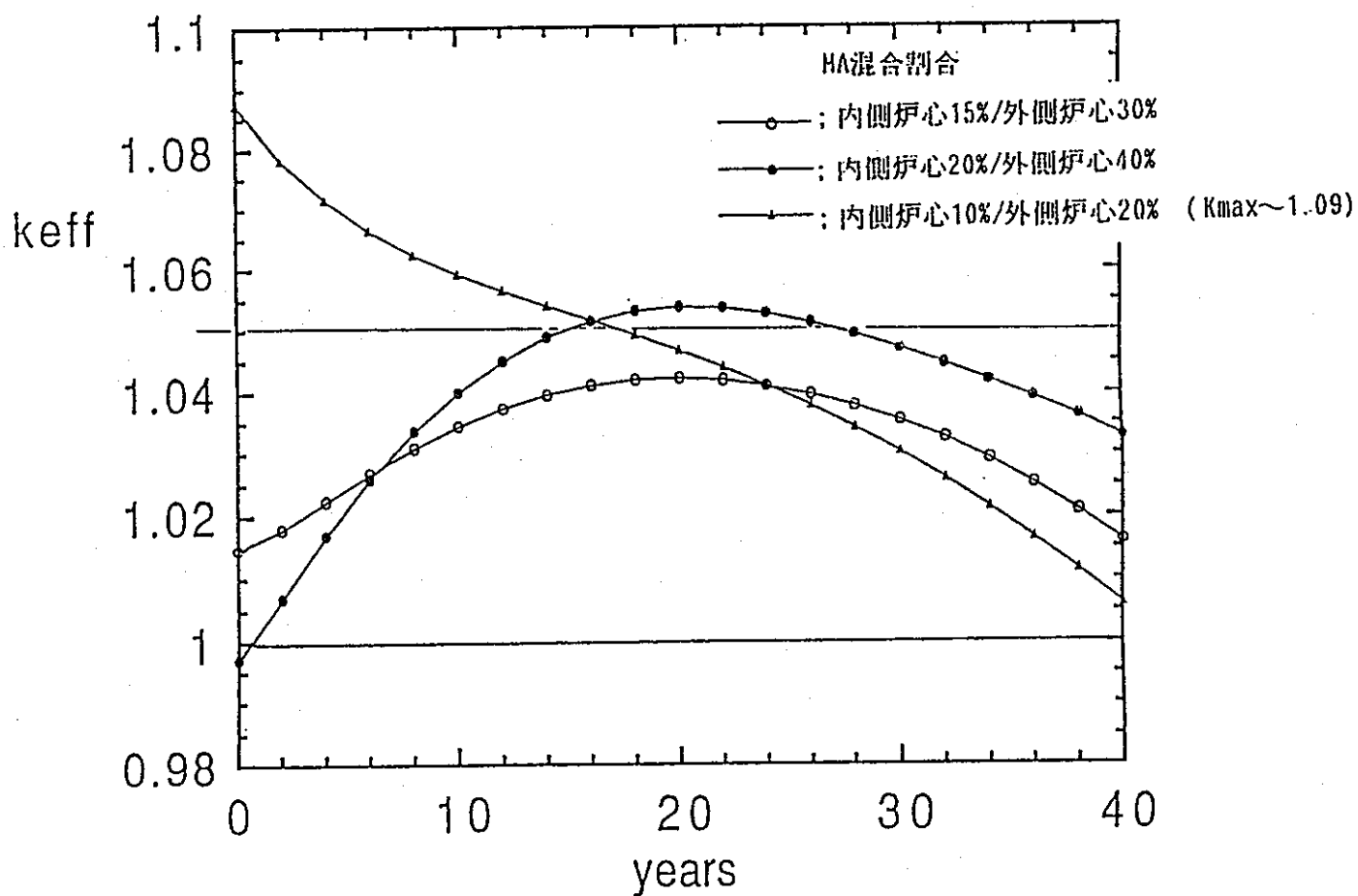


図2.2.4 燃焼に伴う実効増倍率の変化(出力密度と炉心高さが前年度条件の場合)

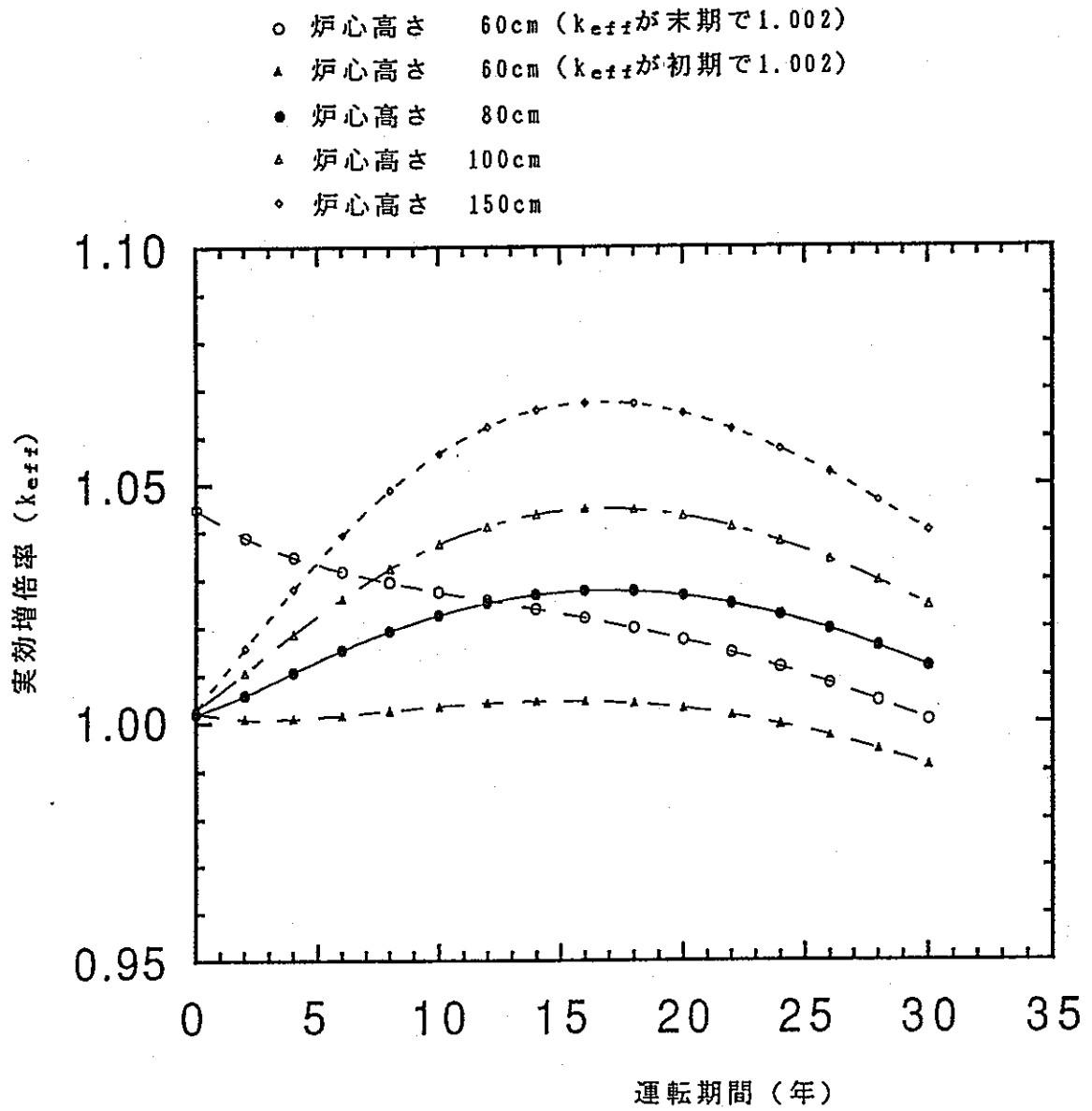


図2.2.5 燃焼による実効増倍率の変化(パラメータ:炉心高さ)

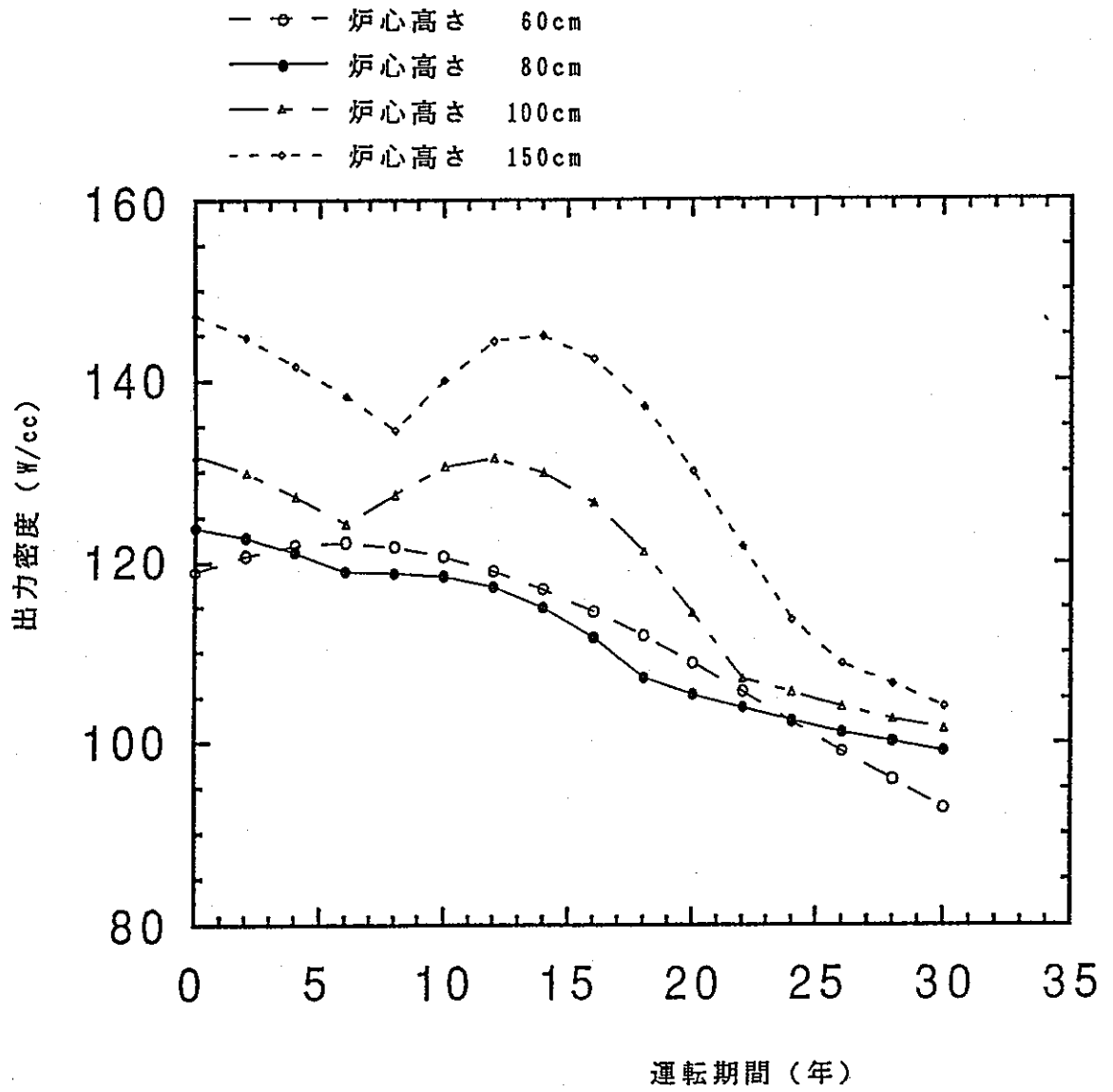


図2.2.6 燃焼による最大出力密度の変化(パラメータ:炉心高さ)

最大変化幅 = (寿命中最大出力 - 寿命中最小出力)の絶対値

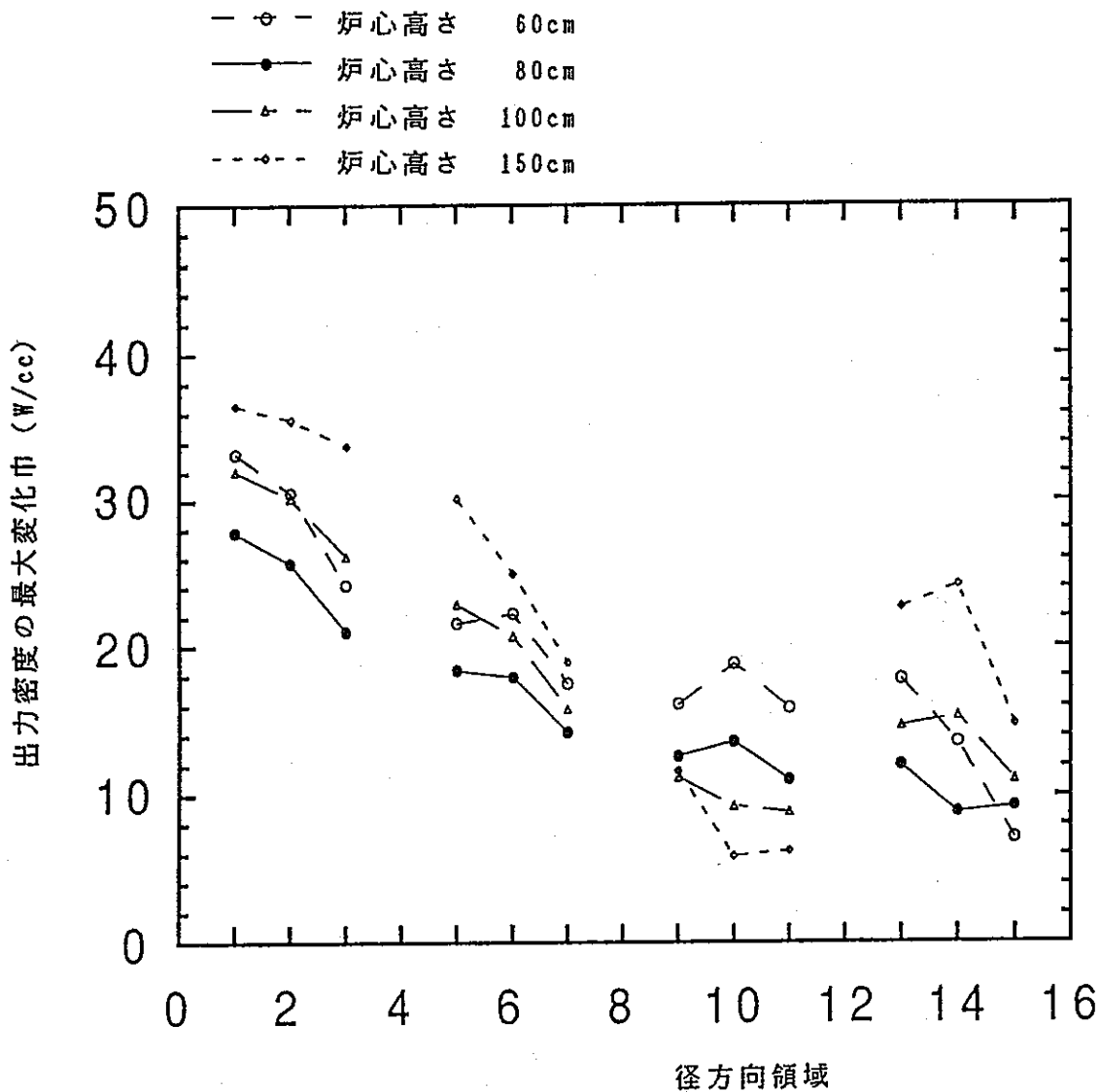


図2.2.7 燃焼による領域平均出力密度の変化幅(パラメータ:炉心高さ)

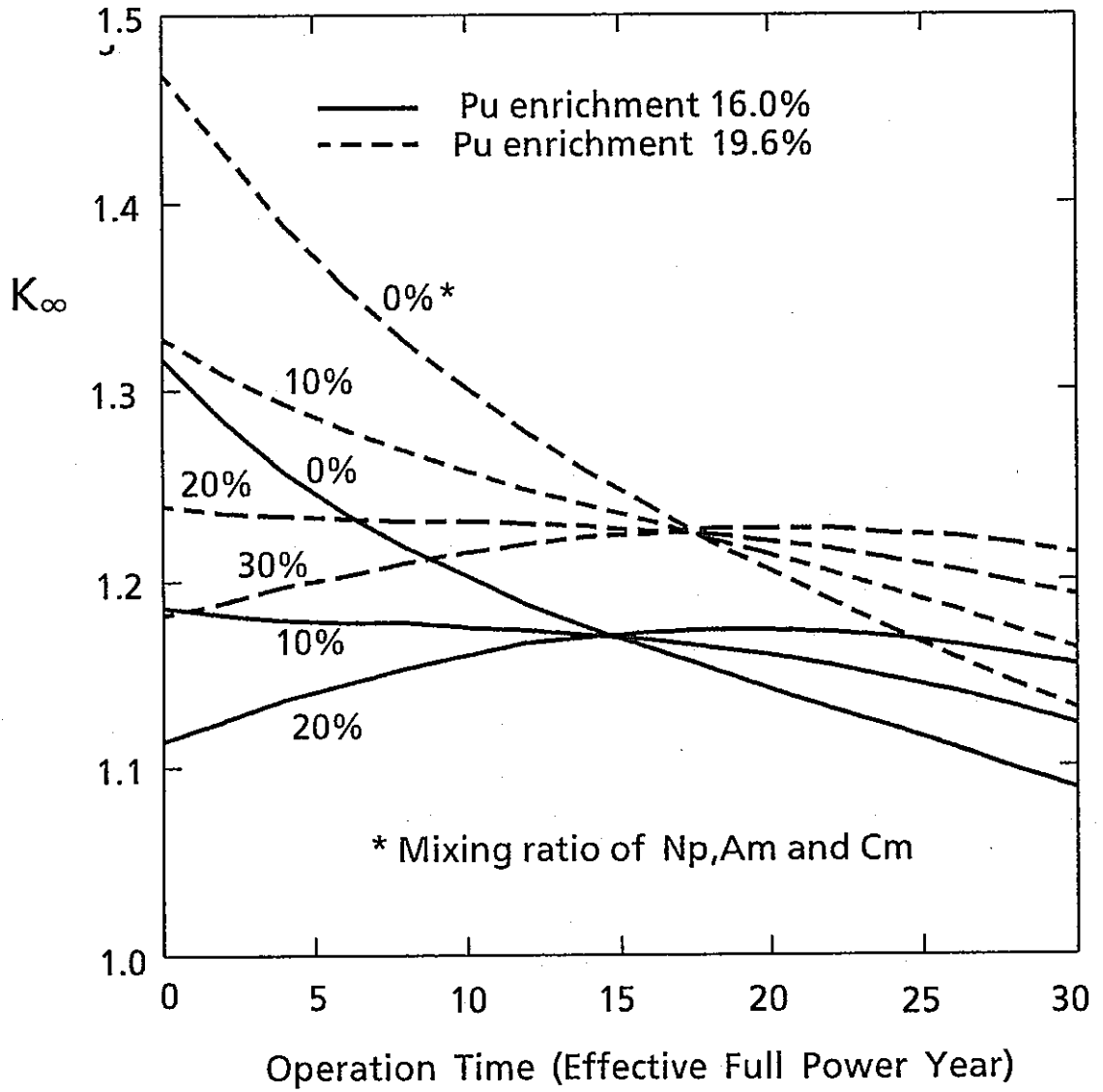


図2.2.8 燃焼による無限増倍率の変化

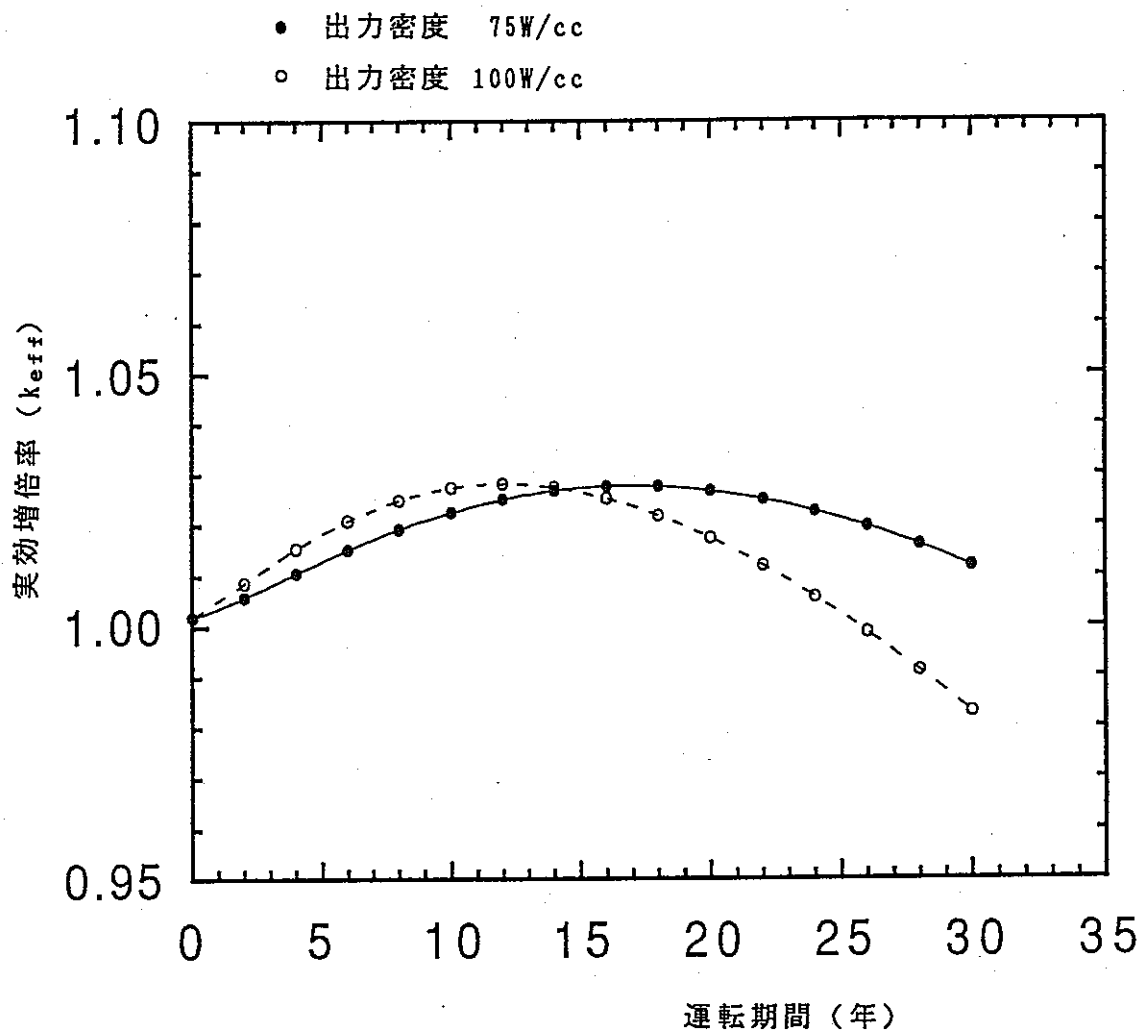


図2.2.9 燃焼による実効増倍率の変化(パラメータ:出力密度)

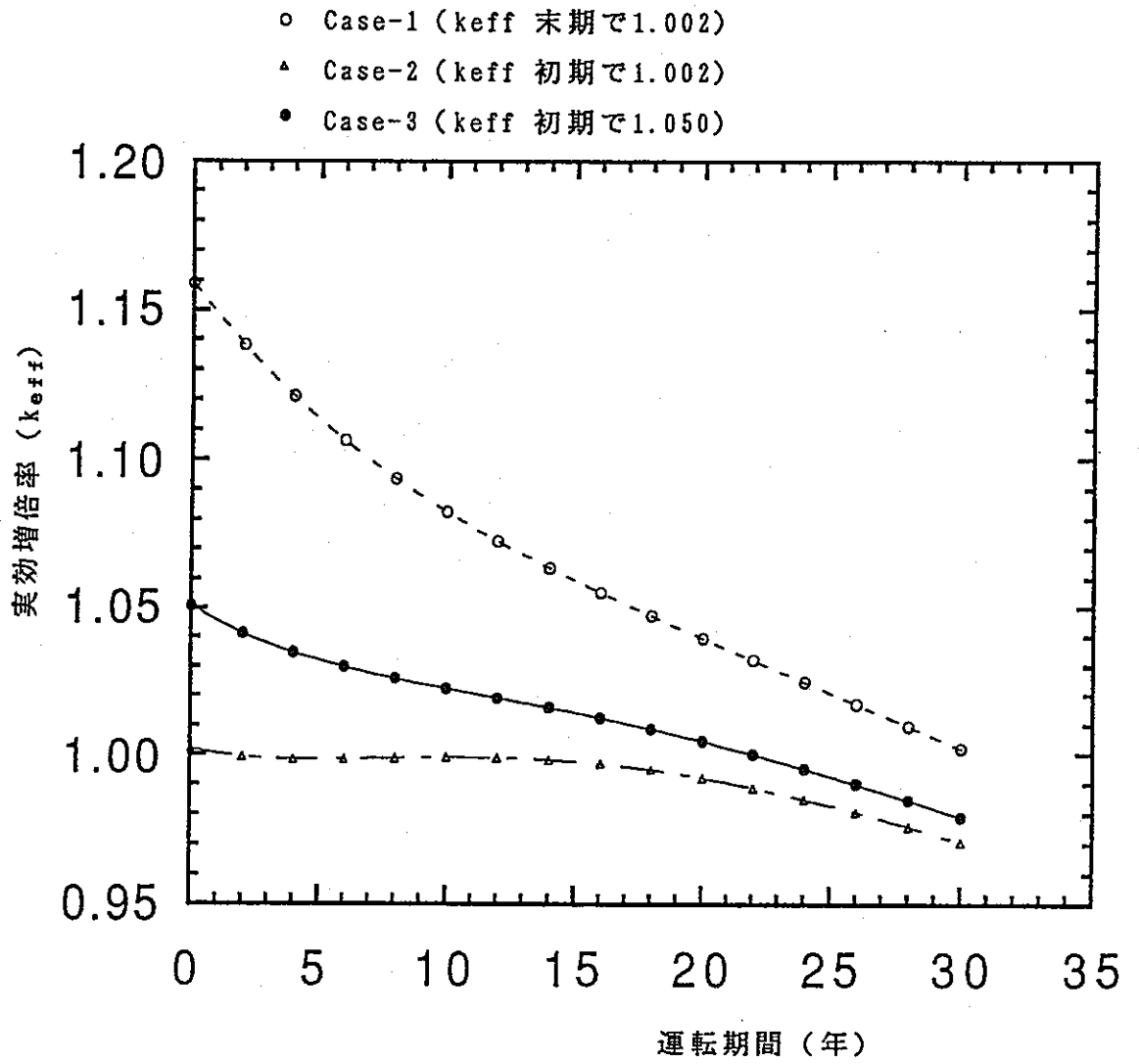


図2.2.10 燃焼による実効増倍率の変化(TRU装荷割合10%の場合)

2.3 炉心核熱特性の解析

選定された炉心仕様に基づき炉心配置を設定し、燃焼特性・TRU消滅特性・反応度係数・動特性パラメータ・制御棒価値・被覆管温度の解析を行った。

(1) 炉心配置の設定

§2.2で選定した炉心仕様に基づき、図2.3.1の炉心配置を設定した。炉心の水平断面図を図2.3.2に示す。炉心等価直径は約410cm、炉心高さは80cmである。高い増殖比は目的でないので、軸径ブランケットについては最小限の厚さとしてある。制御棒本数は30本で炉心集合体本数の10%である。

(2) 計算手法

燃焼特性は二次元RZ7群解析で求めた。出力分布・制御棒価値は三次元三角メッシュ7群拡散計算(初期・中期・末期)により求めた。また、反応度係数・動特性パラメータは二次元RZ70群(一部7群)解析で求めた。(初期・中期・末期)断面積の作成は§2.2と同様の方法で行った。制御棒は余剰反応度に応じて挿入・引き抜き状態を模擬した。

(3) 主要核特性

主要核特性を表2.3.1に示す。反応度変化については図2.3.3にプロットした。反応度寿命は35年とすることが可能であり、この間の反応度変化は $2.5\% \Delta\rho$ と小さい。平均出力密度は初期に77W/ccであるが、末期にはブランケットの分担増加で70W/cc弱となっている。最大線出力はBOCにあらわれており、約220W/cmである。平均燃焼度は34年後で約20万MWd/t、高速フルエンスは約 6.7×10^{23} nvtである。出力分布を図2.3.4に示す。制御棒の挿入状態は、余剰反応度に応じて中期で約40cm挿入、初期と末期では引き抜きとした。制御棒を含む集合体列の集合体出力の燃焼変化を図2.3.5に示す。炉中心付近3列分の集合体は出力変動が大きい、その他は出力変動が小さくなっている。炉中心の3列分の集合体の出力は全体での数%の出力に過ぎず、全体の被覆管温度への影響はそれほど大きくないと考えられる。

(4) TRU消滅特性

TRUの物質収支を表2.3.2に示す。また、Pu、Np、Am、Cm各核種の炉心平均原子数密度の燃焼変化を図2.3.6から2.3.8に示す。以下、末期は34年燃焼後としている。

TRU (Np, Am, Cm)の装荷量は9.6トンであり、そのうち約55%の5.3トンが消滅している。100万KWePWR(毎年約27KgのTRU発生)約6基からのTRUを毎年消滅できる消滅量である。Np, Am, Cmとも合計で見ればそれぞれが減少しているが、核種ごとにみると、高次Cm(Cm-245, Cm246)は逆に

増大していることがわかる。また、Puについてみると増大が著しい。Pu同位元素比は以下のように変動する。

Pu同位元素比の変化(単位w/o)

	Pu238	Pu239	Pu240	Pu241	Pu242
装荷時	0.0	58.0	24.0	14.0	4.0
取出時	26.4	45.8	20.1	2.2	5.5

(5) 制御棒価値

ここでは制御棒の組成比を以下とした。吸収材/構造材/冷却材=39.1/12.7/48.2(%)。吸収材はスミヤ密度比87%としている。また、B-10濃縮度は85%とした。

制御棒価値計算値を表2.3.3に示す。ここでは、ワンロードスタック因子として主系/後備系=0.85/0.8とし、また計算値への補正を0.85とした。

必要制御反応度との比較を表2.3.4に示す。主炉停止系の必要制御反応度は図2.3.3に示した炉心の余剰反応度を基にしている。中期で余剰反応度が最大となり、この時が最も主炉停止系の反応度収支が厳しいものの、結果的には余裕がある。この結果からは制御棒設計が成立しているが、必要制御反応度の設定など暫定値を用いていることから概略の評価と考える必要がある。

(6) 反応度係数と動特性パラメータ

Naボイド反応度とドップラー係数

炉心部のNaボイド反応度とドップラー係数を表2.3.5に示す。Naボイド反応度の絶対値は約 $2.4\% \Delta \rho$ (70群計算値)で従来の大型炉並みの大きさである。100万KWe超長寿命炉心のNaボイド反応度が約 $3\% \Delta \rho$ であったので、20%ほど削減されていることになる。これは、炉心径の削減(500cmから410cm)と炉心高さの削減(180cmから80cm)による減少効果と、TRU装荷割合の増加(約11%から22%)による増大効果が競合した結果、減少効果が勝ったためである。燃焼による変化は小さいが、燃焼によるFP蓄積効果がTRUインベントリの減少効果で相殺されるためである。ドップラー係数は約 $-1.5 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ (70群計算値)とほぼ同一炉心寸法である従来の大型炉の値約 $-8 \sim -9 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ と比べ約5分の1と小さい。これはU割合の減少と中性子スペクトル硬化によるものである。中性子スペクトルを図2.3.9に示す。

出力係数及び等温温度係数

表2.3.6には初期炉心の密度係数及び形状係数を示す。また、表2.3.7には、表2.3.5と表2.3.6のデータをもとにして評価した初期炉心の出力係数及び等温温度係数を示す。これらの評価において、平均燃料温度は約650°Cとした。この表からわかるように、従来の大型炉心に比べ、出力上昇及び冷却材温度上昇に伴う反応度フィードバックが小さいといえる。(大型炉心ではどちらの係数も 10^{-6} オーダーである) 特に、等温温度係数についてはわずかに正の値を示している。このような結果となった最大の理由はドップラー係数の絶対値が非常に小さいことであるが、また、冷却材密度係数の絶対値がかなり大きいことも関係している。

出力係数が負で小さい値であることは、反応度外乱に対して安定した時の出力の変化量が大いことを意味する。しかし、出力の変化が速くなるのではないので、時間をかけて大きな出力変化をすることになる。(出力の時間変化には実効遅発中性子発生割合や即発中性子寿命が関係する) 一方、等温温度係数が負でないことは、なんらかの原因による冷却材温度上昇時(入口温度上昇など)に反応度が増加することになる。ただちに本炉心が成立しないことにはならないが、制御上及び安全上の観点から従来炉心よりも慎重な運転が要求される。もんじゅの設計では温度係数は負であることが設計条件である。本炉心ではドップラー係数の改善が必要となる可能性がある。

動特性パラメータ

実効遅発中性子発生割合の計算にあたって使用した核種ごとの遅発中性子発生数を表2.3.8に示す。遅発中性子群割合はU・PuについてはTuttle(9)のデータ、TRUについてはBrady(10)・Blachot(11)のデータ、スペクトルはSaphierら(12)のPuのデータを全核種に適用した。動特性パラメータを表2.3.9に示す。実効遅発中性子発生割合は従来のMOX大型炉の0.0038程度と比べて約30%小さい。これは遅発中性子発生割合への寄与が大きいU-238の核分裂割合が小さいためと考えられる。実効遅発中性子発生割合が小さいことでNaボイド反応度は実効的には大きくなる。ドル単位であらわすと約8ドルとなる。

以上のように、本炉心の反応度係数や動特性パラメータはかなり従来の炉心とは異なる。一方、平均線出力は130W/cmと従来炉心の約3分の1であり、通常時の燃料平均温度はたかだか650°Cであるという安全特性上の利点もある。今後、炉心動特性解析によりこれらの影響を定量的に検討する必要がある。また、等温温度係数がわずかながらも正であり、ドップラー係数の改善が必要となる可能性がある。

(7) 被覆管最高温度

以下の前提条件により簡易評価を行った。

- | | |
|--------------------|------------|
| ①一次系冷却材流量 | 3960Kg/sec |
| ②炉心・ブランケット流量割合 | 93% |
| ③グローバルホットチャンネルファクタ | 1.33 |

(出力分布誤差・流配誤差を含む、従来炉の5%増仮定)

- | | |
|----------------|------|
| ④被覆管・冷却材温度差最大値 | 20°C |
|----------------|------|

(冷却材フィルム内温度上昇を含む)

流量領域を炉心部4領域として、寿命中の各領域内被覆管最高温度が等しくなるように流量配分を行った。流量領域を図2.3.8に示す。領域流量と被覆管最高温度を表2.3.10に示す。結果からわかるように、被覆管最高温度を700°C以下とするには径方向ブランケットを最初の想定72本から40体程度に減じなければならない。これまで径方向ブランケットは暫定的に一層設けているが、本炉心の目的はPu増殖ではないことから被覆管温度を低減するために削減(場合によって全部削除)することが可能である。

また、燃料設計上は30年間の照射でNa及びFPの腐食が過大にならないことを確認する必要がある。腐食量は温度条件に敏感なので、被覆管温度はできるだけ低減することが望ましいが、必要であれば径方向ブランケットを全部削除すれば、さらに低減することが可能である。

表2.3.1 選定炉心の炉心仕様と主要核特性

項目	値
熱出力	755MW
炉心寿命	34年(実効)
集合体数 炉心(内側/外側) 径ブランケット 制御棒(主/後備)	151/168 72 24/6
炉心高さ 軸ブランケット厚さ 炉心等価直径	800mm 200mm×2(上/下) 4100mm
TRU装荷割合(内側/外側)	15/30w/o
Pu富化度 (w/o)	15.97/19.83 (17.79)
最大余剰反応度 (% $\Delta\rho$)	2.3
増殖比 (初期/末期)	0.961/1.175
出力密度(W/cc) 平均(初期) 最大(初期/中期/末期)	77 128/122/98
線出力(W/cc) 平均(初期) 最大(初期/中期/末期)	133 221/211/169
燃焼度(MWd/t) 集合体平均 ペレット最大	198000 285000
中性子フルエンス (高速群、nvt)	6.7×10^{23}

*内側炉心/外側炉心、**炉心平均

表2.3.2 重金属物質収支

核種	装荷量(kg)			34年運転直後(kg)			増減(kg) Total
	core	rbl	abl	core	rbl	abl	
235U	83.6	48.7	66.1	20.5	30.5	32.2	-115.2
236U	0.0	0.0	0.0	11.2	4.4	7.8	+23.4
238U	27785.1	16179.3	21954.6	22678.0	15301.8	20049.3	-7890.0
U-Total	27868.7	16228.0	22020.7	22709.6	15336.8	20089.2	-7981.8

237Np	4711.7	0.0	0.0	1692.2	1.8	4.0	-3013.7

238Pu	0.0	0.0	0.0	1906.5	0.3	1.2	+1908.1
239Pu	3456.7	0.0	0.0	3301.7	639.8	1200.5	+1685.3
240Pu	1430.2	0.0	0.0	1451.8	40.1	118.6	+180.3
241Pu	834.2	0.0	0.0	157.7	1.3	5.9	-669.3
242Pu	238.4	0.0	0.0	398.4	0.1	0.4	+160.5
Pu-Fiss	4290.9	0.0	0.0	3459.4	641.1	1206.4	+1016.0
Pu-Total	5959.5	0.0	0.0	7216.1	681.6	1326.6	+3264.7

241Am	2876.0	0.0	0.0	1279.3	0.5	2.4	-1593.8
242mAm	7.3	0.0	0.0	126.0	0.0	0.1	+118.7
243Am	1486.9	0.0	0.0	670.8	0.0	0.0	-816.1
Am-Total	4370.3	0.0	0.0	2076.1	0.5	2.5	-2291.2

242Cm	0.1	0.0	0.0	14.3	0.0	0.0	+14.3
243Cm	4.9	0.0	0.0	1.9	0.0	0.0	-2.9
244Cm	478.6	0.0	0.0	369.6	0.0	0.0	-109.0
245Cm	24.8	0.0	0.0	76.3	0.0	0.0	+51.6
246Cm	0.0	0.0	0.0	10.3	0.0	0.0	+10.3
Cm-Total	508.3	0.0	0.0	472.5	0.0	0.0	-35.9

TRU-Total	9590.3	0.0	0.0	4240.8	2.3	6.6	-5340.7
METAL-Total	43418.6	16228.0	22020.7	34166.5	16020.6	21422.3	-10057.8

表 2.3.3 制御棒価値計算値(% $\Delta\rho$)

	主炉停止系	後備停止系
初期(0年)	5.46	1.30
中期(18年)	5.91	1.42
末期(34年)	6.20	1.32

*7群三次元三角メッシュ拡散

表 2.3.4 制御棒の反応度収支

	主炉停止系	後備停止系
必要制御反応度(% $\Delta\rho$)		
温度補償	0.7*	0.5*
燃焼補償(初期/中期/末期)	0.2/2.5/0.2	
安全余裕	0.4*	0.3*
合計	1.3/3.6/1.3	0.8
制御棒価値		
全数挿入計算値(% $\Delta\rho$ 、初期/中期/末期)	5.46/5.91/6.20	1.30/1.42/1.32
ワンロードスタック因子	0.85*	0.80*
計算への補正	0.85*	0.85*
ワンロードスタック時評価値 (% $\Delta\rho$ 、初期/中期/末期)	3.9/4.3/4.5	0.9

*暫定値

表 2.3.5 反応度係数計算値(二次元RZ拡散)

	7群計算値	70群計算値
Naボイド反応度($\% \Delta \rho$)		
初期(0年)	2.05	2.47
中期(18年)	2.04	-
末期(34年)	2.07	-
ドップラー係数(Tdk/dT)		
初期(0年)	-1.71×10^{-3}	-1.43×10^{-3}
中期(18年)	-1.83×10^{-3}	-
末期(34年)	-1.74×10^{-3}	-

表 2.3.6 密度係数及び形状係数(初期炉心、炉心部)

	計算値
燃料密度係数($\Delta \rho / \Delta N / N$)	0.2775
構造材密度係数($\Delta \rho / \Delta N / N$)	-0.0768
冷却材密度係数($\Delta \rho / \Delta N / N$)	-0.0238
径方向形状係数($\Delta \rho / \Delta R / R$)	0.0447
軸方向形状係数($\Delta \rho / \Delta H / H$)	0.1325

*二次元70群RZ拡散計算値

表 2.3.7 出力係数、等温温度係数(初期炉心、炉心部)

	計算値
出力係数(単位: $\Delta\rho/\text{MWth}$)	
ドップラー効果	-5.70×10^{-7}
燃料密度効果	-6.77×10^{-7}
構造材密度効果	4.40×10^{-7}
冷却材密度効果	6.71×10^{-7}
(合計)	(-1.36×10^{-7})
等温温度係数(単位: $\Delta\rho/^\circ\text{C}$)	
ドップラー効果	-1.56×10^{-6}
燃料密度効果	-1.89×10^{-6}
構造材密度効果	4.44×10^{-6}
冷却材密度効果	6.76×10^{-6}
支持板膨張効果	-7.13×10^{-6}
(合計)	(0.59×10^{-6})

表2.3.8 遅発中性子発生割合(%)

核種	発生量
^{235}U	0.0167 *1)
^{238}U	0.0439 *1)
^{238}Pu	0.0047 *1)
^{239}Pu	0.0063 *1)
^{240}Pu	0.0095 *1)
^{241}Pu	0.0152 *1)
^{242}Pu	0.0221 *1)
^{237}Np	0.0114 *2)
^{241}Am	0.0051 *2)
$^{242\text{m}}\text{Am}$	0.0078 *2)
^{243}Am	0.0080 *2)
^{242}Cm	0.0014 *2)
^{243}Cm	0.0025 *3)
^{244}Cm	0.0036 *3)
^{245}Cm	0.0064 *2)

*1) R. j. Tuttle, "Delayed Neutron Yields in Nuclear Fission."

Consaltants Meeting on Delayed Neutron Propaties. IAEA, Vienna, 1979

*2) M. C. Brady and T. R. England, NSE, Vol. 103 (1989)

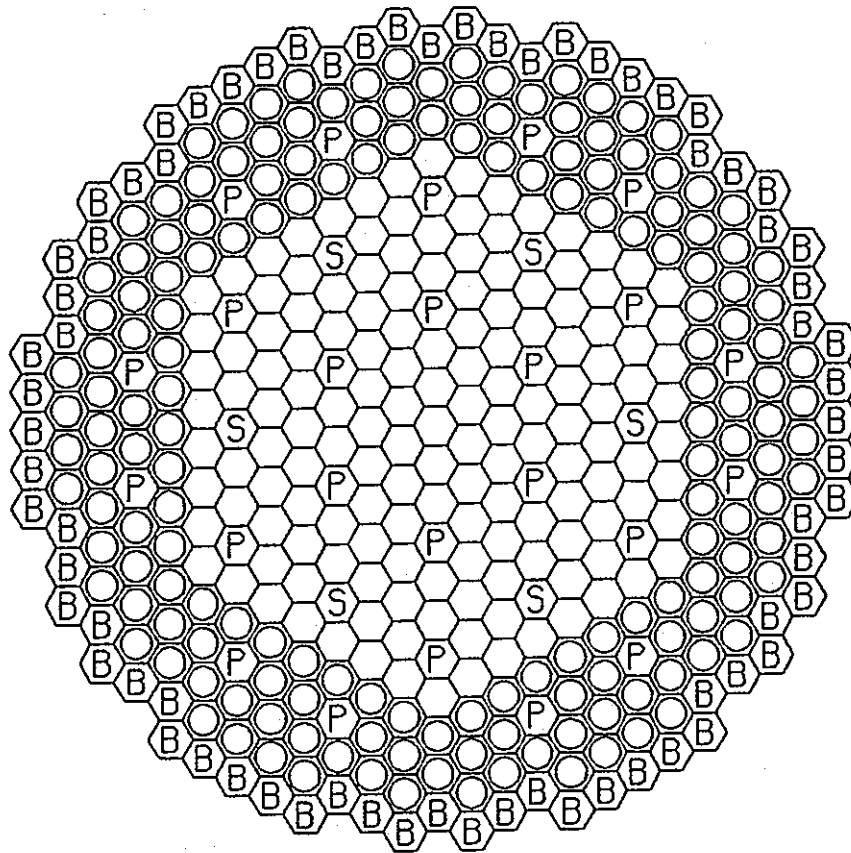
*3) J. Blachot, Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology,
Tulich, 13 May 1991

表2.3.9 動特性パラメータ

項目		初期 0年	中期 18年	末期 34年
遅発中性子割合 β_{eff}		3.108×10^{-03}	2.851×10^{-03}	2.806×10^{-03}
β_{eff} 内訳	^{235}U	4.599×10^{-05}	2.491×10^{-05}	1.637×10^{-05}
	^{238}U	1.320×10^{-03}	1.269×10^{-03}	1.236×10^{-03}
	$^{238}\text{P u}$	3.705×10^{-11}	1.634×10^{-04}	2.057×10^{-04}
	$^{239}\text{P u}$	6.252×10^{-04}	7.146×10^{-04}	7.779×10^{-04}
	$^{240}\text{P u}$	1.019×10^{-04}	1.090×10^{-04}	1.151×10^{-04}
	$^{241}\text{P u}$	4.742×10^{-04}	1.553×10^{-04}	1.103×10^{-04}
	$^{242}\text{P u}$	2.858×10^{-05}	4.715×10^{-05}	5.278×10^{-05}
	$^{237}\text{N p}$	3.562×10^{-04}	1.991×10^{-04}	1.382×10^{-04}
	$^{241}\text{A m}$	8.288×10^{-05}	5.359×10^{-05}	3.954×10^{-05}
	$^{242\text{m}}\text{A m}$	2.438×10^{-06}	4.909×10^{-05}	5.281×10^{-05}
	$^{243}\text{A m}$	4.966×10^{-05}	3.124×10^{-05}	2.451×10^{-05}
	$^{242}\text{C m}$	1.541×10^{-09}	4.156×10^{-07}	3.066×10^{-07}
	$^{243}\text{C m}$	4.948×10^{-07}	3.543×10^{-07}	2.618×10^{-07}
	$^{244}\text{C m}$	1.385×10^{-05}	1.440×10^{-05}	1.266×10^{-05}
	$^{245}\text{C m}$	5.706×10^{-06}	1.909×10^{-05}	2.361×10^{-05}
即発中性子寿命 ℓ_p (sec)		1.465×10^{-07}	1.913×10^{-07}	2.196×10^{-07}

表 2.3.10 各領域流量と被覆管最高温度

流量領域	流量	集合体出力最大 (集合体ピーキング)	被覆管最高温度	
			径ブランケット 72体の場合	径ブランケット 42体の場合 (削減)
内側炉心1	11.4 Kg/s	3.27MW (1.02)	702 °C	694 °C
内側炉心2	9.7 Kg/s	2.65 MW(0.07)	702 °C	694 °C
外側炉心1	11.6 Kg/s	3.02 MW(1.12)	702 °C	694 °C
外側炉心2	10.6 Kg/s	2.30 MW(1.35)	702 °C	694 °C
径ブランケット	4.2 Kg/s	0.563 MW(2.15)	702 °C	694 °C








	内側炉心燃料集合体	151 体
	外側炉心燃料集合体	168 体
	ブランケット燃料集合体	72 体
	主炉停止系制御棒	24 体
	後備炉停止系制御棒	6 体

図2.3.1 30万KWe最適化炉心の炉心配置

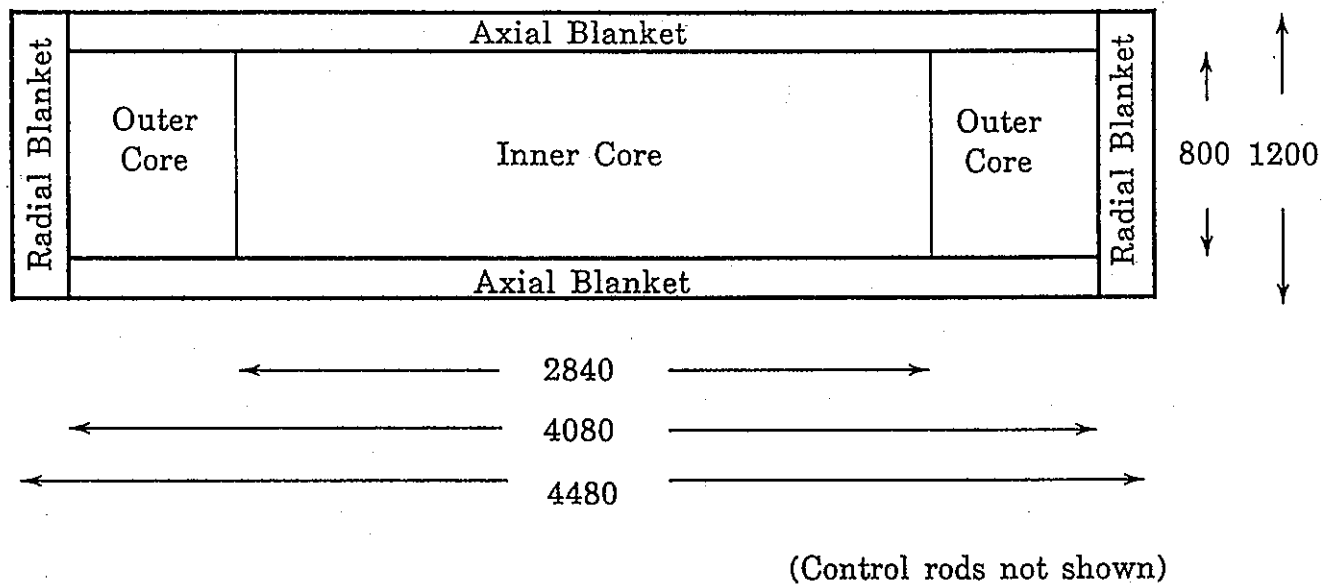


図2.3.2 30万KWe最適化炉心の水平断面図

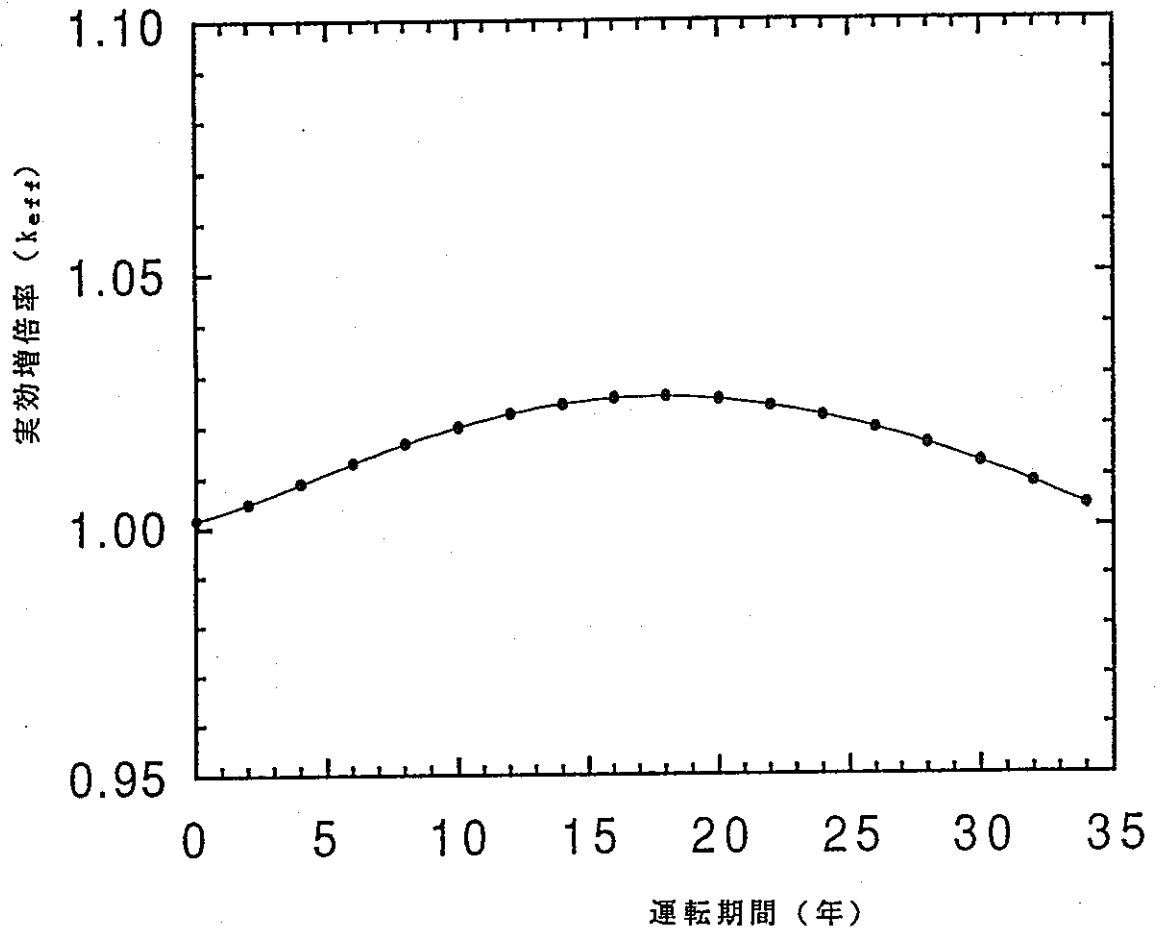


図2.3.3 燃焼による実効増倍率の変化(最適化炉心)

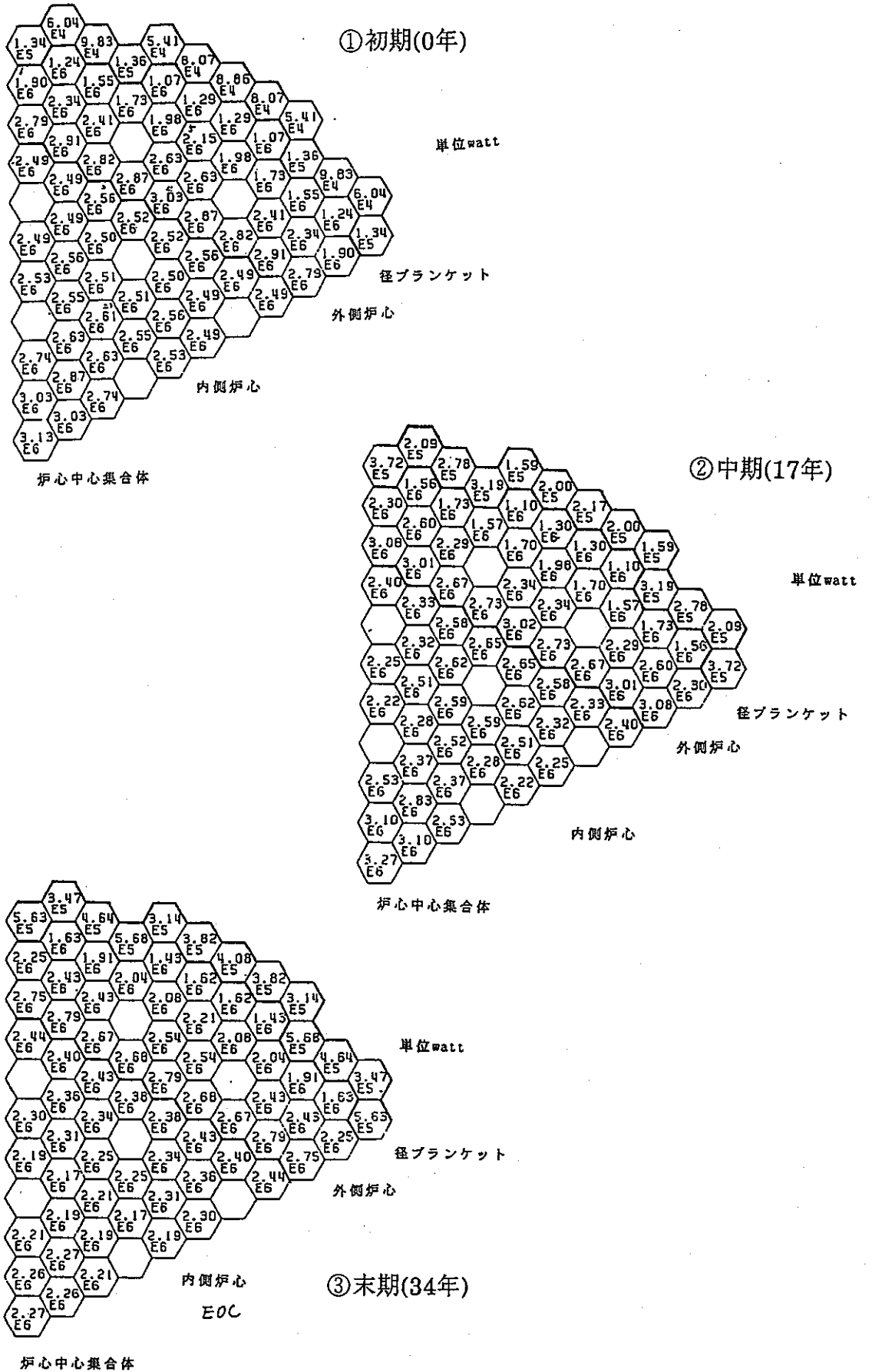


図2.3.4 集合体出力分布の燃焼変化

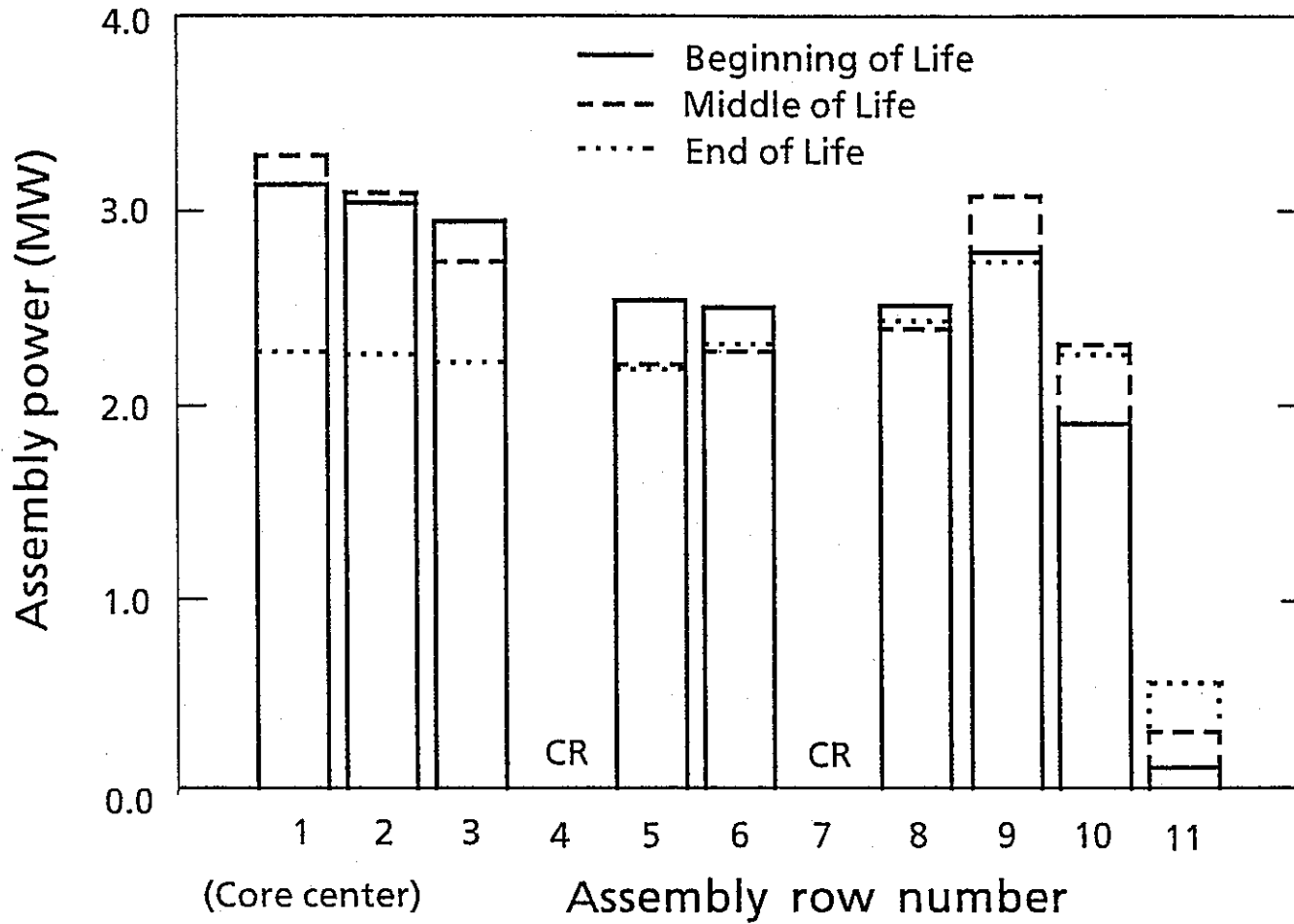


図2.3.5 燃焼による集合体出力の変化

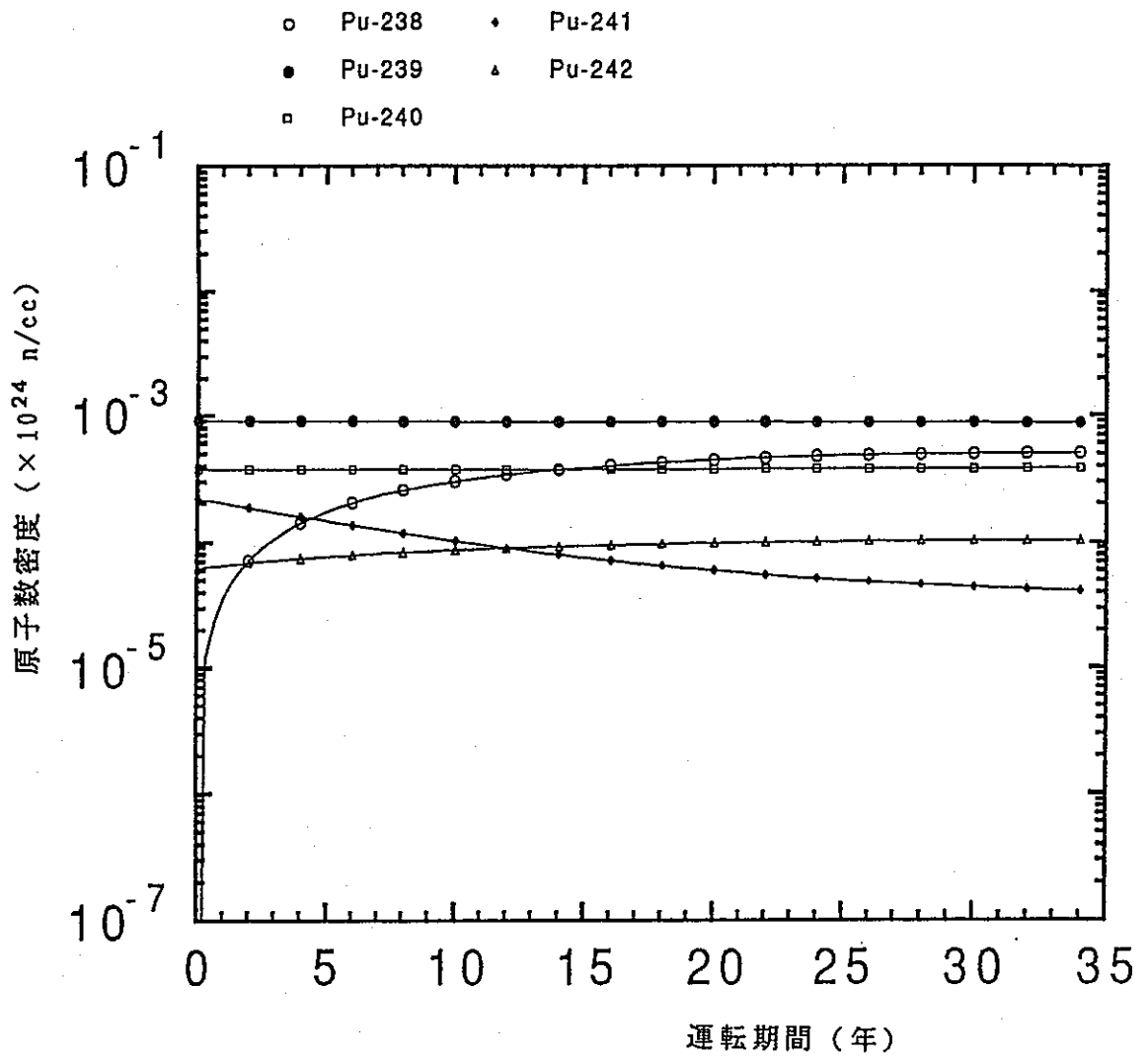


図2.3.6 Pu各同位元素の炉心平均原子数密度の変化

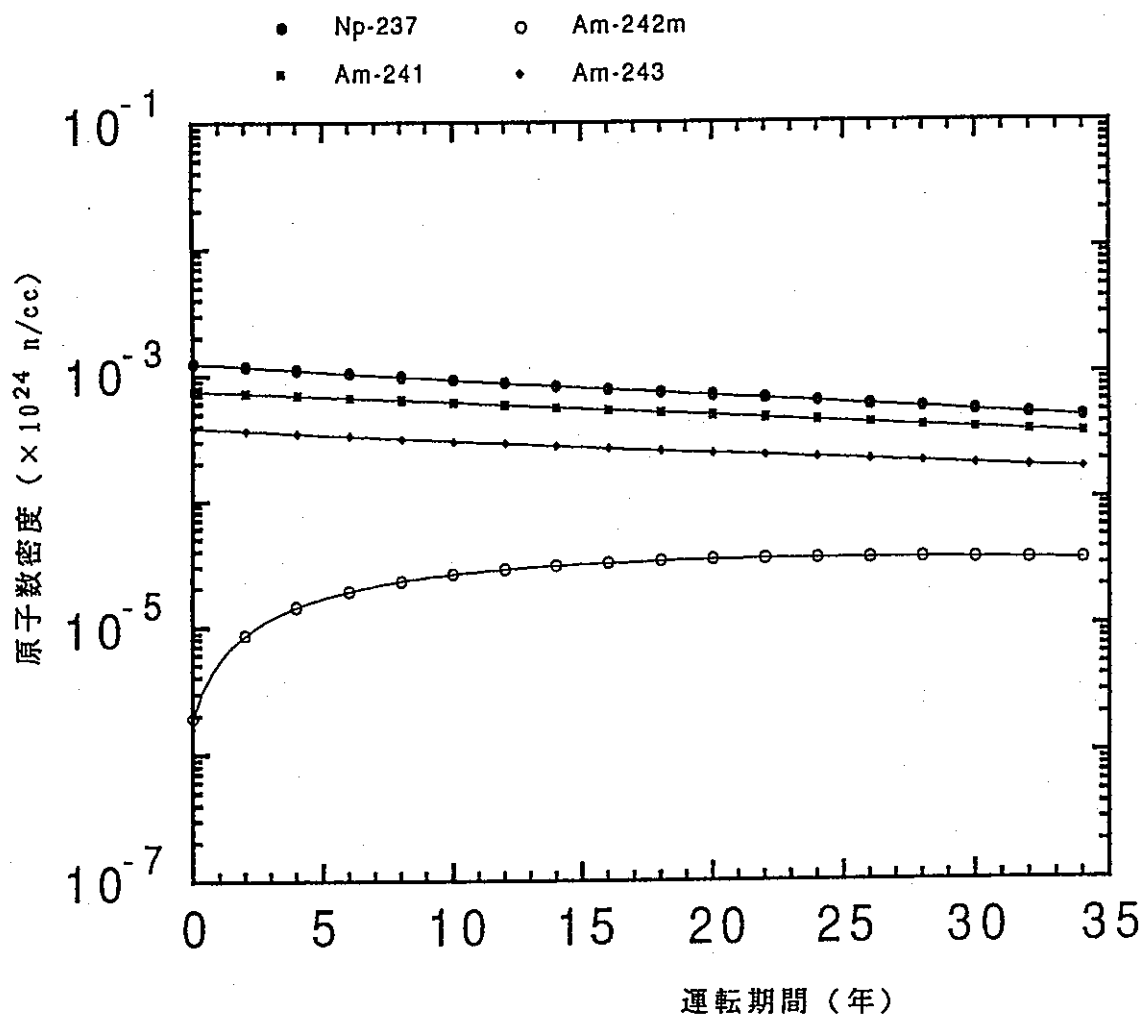


図2.3.7 Np及びAm各同位元素の炉心平均原子数密度の変化

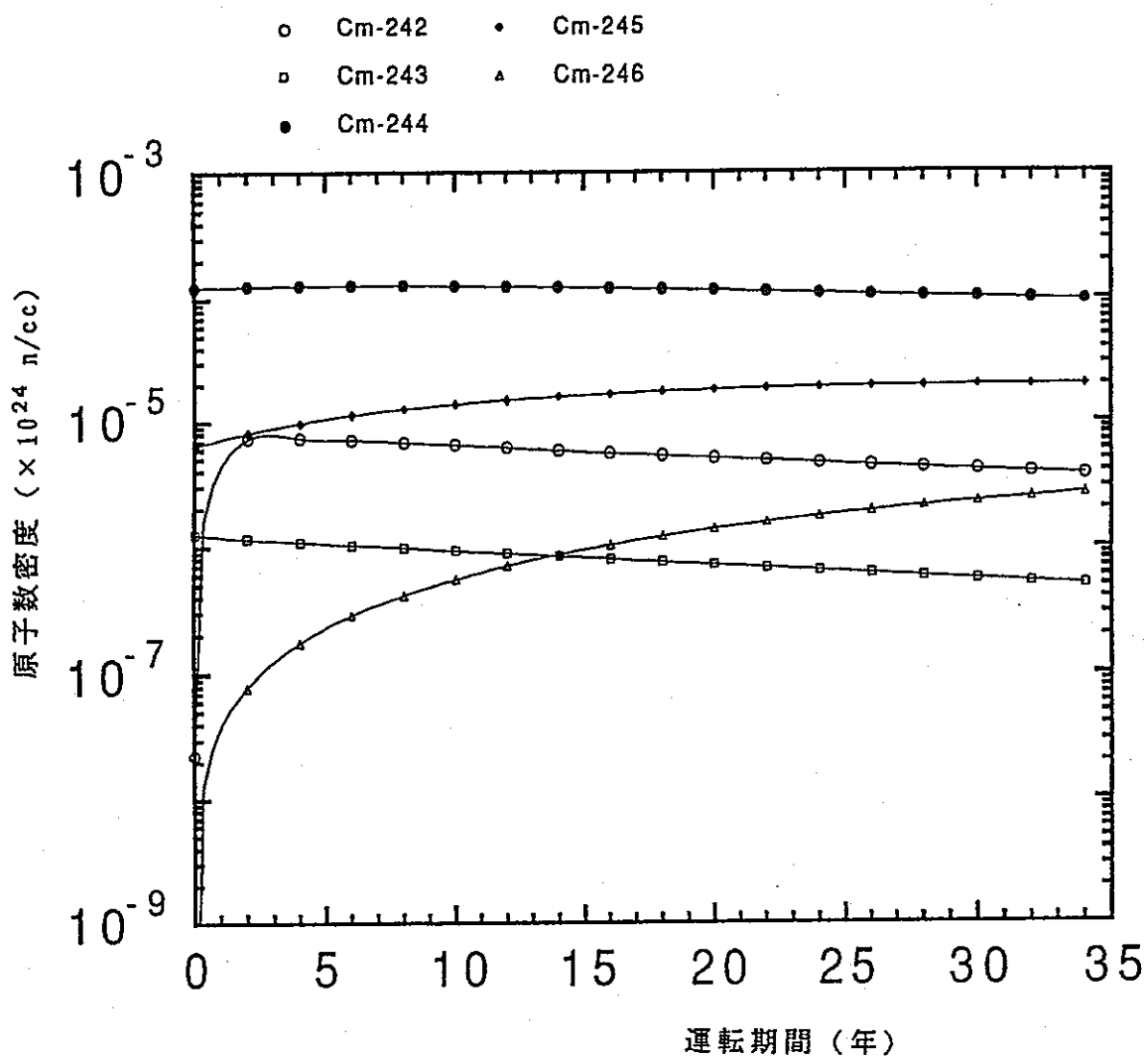


図2.3.8 Cm各同位元素の炉心平均原子数密度の変化

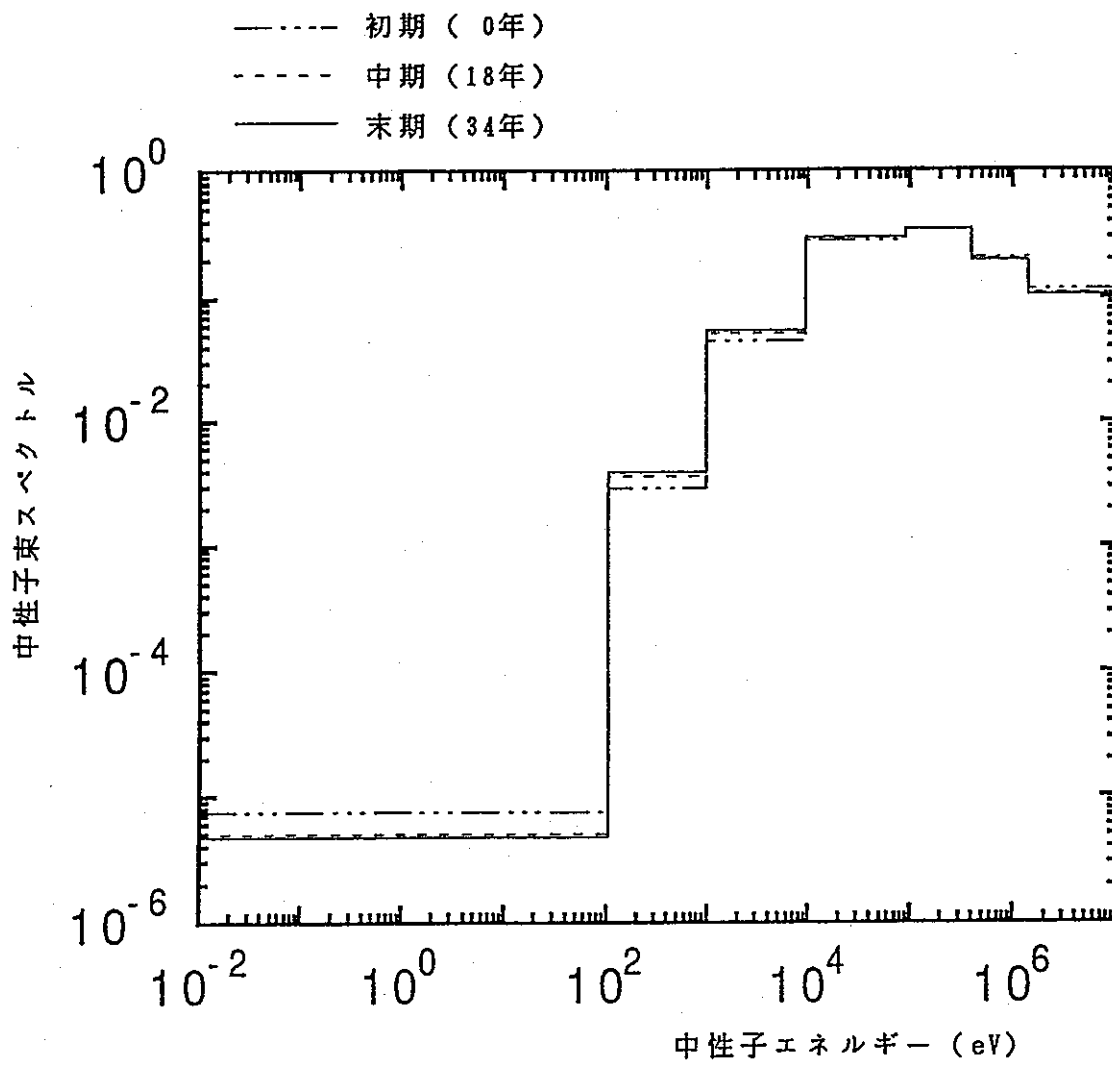


図2.3.9 炉心部中性子スペクトル

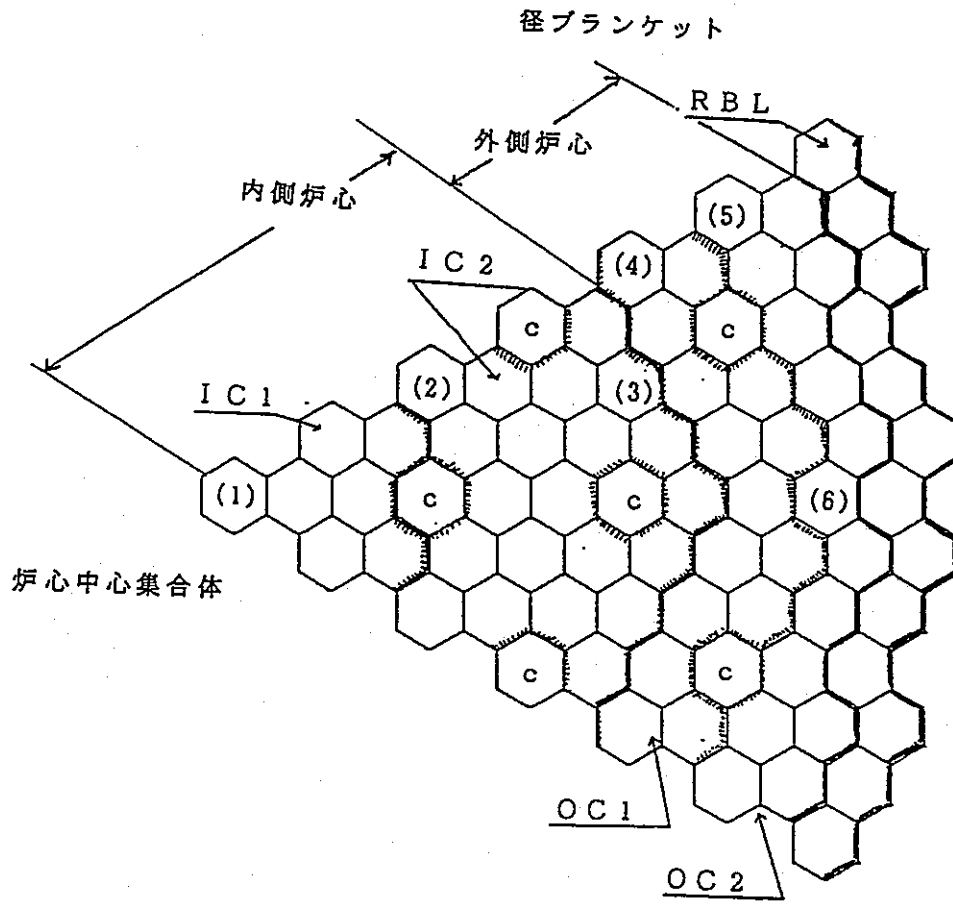


図2.3.10 集合体流量配分領域

2.4 燃料に関する検討

以下では燃料に関しての若干の検討結果を示す。

(1)被覆管材料

§2.3の結果から、本炉心の平均取出燃焼度は20万MWd/tで高速フルエンスは約 6.5×10^{23} nvtに達している。この条件下で使用するにはきわめてスエリングの小さい材料を用いることが必要であり、フェライト系材料を被覆管に用いることが考えられる。このため、本炉心の実現には高温クリープ強度の強いフェライト系材料、例えば開発中のODS鋼の使用が前提となる。

(2)被覆管肉厚とプレナム長さ

被覆管肉厚は表2.1.3に示すように0.7mmに設定しており、ピン径と肉厚の比は $12.2/0.7=17.4$ であり、大型炉設計(60万KWe、燃焼度約8.6万MWd/t)(13)の17.7と同程度である。従って、被覆管温度や被覆管減肉量が同程度なら、プレナム長さは大型炉設計に対して燃焼度比例の長さが必要である。大型炉設計のプレナム長さは700mmであり、本炉心では燃焼度比から $20/8.6=2.3$ 倍、即ち1600mmのガスプレナムが必要である。被覆管腐食量はこの想定より大きい可能性があるが、一方、さらに強度の高い材料が開発される可能性もある。従って、現状では燃料仕様についてこれ以上の詳細な議論はできない。

(3)被覆管腐食量

被覆管腐食量については燃焼度及び実質的な使用期間が実証炉クラスのそれぞれ2倍、10倍程度と長いことから、その量が過度にならないことが必要である。Naによる外面腐食に関してはフェライト系材料であるPNC-FMS鋼では従来材(オーステナイト系)に比べ腐食量が小さく、ほとんど腐食しないというデータが得られつつある。内面腐食量については、現状の設計ではある燃焼度(PNC1520では57500MWd/t))で飽和するとしているが、30年間という長い照射でも同様とするにはデータ不足である。Na腐食、内面腐食ともさらなるデータ蓄積が待たれる。

(4)集合体長とバンドル圧損

ガスプレナム長さが1600mmとできるならば、炉心ペレットスタック800mm、軸ブランケットペレットスタック200mm×2、その他端栓等を150mmとして、ピン長は2950mmとなる。大型炉ではピン長2550mmで集合体長4300mmであることから、上記条件では本炉心の集合体長として4700mm程度が可能である。炉心高さを低くしたために、プレナム長さをかなり増大してもこのような集合体長ですんでいる。

燃料ピン径12.2mmでワイヤ径0.8mmと、かなりタイトな燃料仕様であるが、出力密度が低く1体当たり最大流量が約12Kg/secと従来炉心の数分の1と小さいのでバンドル圧損は約0.5Kg/cm²と小さい。

2.5.まとめと今後の課題

TRU燃料を装荷した30万KWe級超長寿命炉心の検討を行い、以下の結果を得た。

- (1) 出力密度75W/cc、炉心高さ80cm、炉心径約410cm(炉心体積は従来の100万KWe炉心並み)、炉心平均TRU装荷割合22%とすることにより、30年間の反応度変化約2.5% Δk の超長寿命炉心が得られた。内外炉心のTRU装荷割合を1:2とすることにより出力変動を抑えることができた。昨年度検討の30万KWe級超長寿命炉心は、出力密度55W/cc・炉心高さ100cm・炉心径約425cmであった(5)ので、炉心高さと炉心径の双方を削減し、30%以上の体積コンパクト化ができた。これはTRU装荷割合を上げたことによる。
- (2) 本炉心の主要特性として、最大線出力約220W/cm、被覆管最高温度694°Cが得られた。TRU消滅量は34年間で約5.3トンであり、100万KWe軽水炉約6基からのTRUを毎年消滅できる。Naボイド反応度は従来の100万KWe炉心並みの大きさである。但し、実効遅発中性子発生割合が0.31とやや小さくドル単位では大きくなる。ドップラー係数は従来の100万KWe炉心の5分の1程度と小さい。このため、等温温度係数がわずかながら正となっている。(出力係数は負)

本炉心を成立させるための課題をまとめて以下に示す。

(1)炉心安全特性の検討

本炉心では反応度特性や動特性パラメータが従来炉心とはかなり異なる。特にドップラー係数が小さい。出力係数はかろうじて負であるが、等温温度係数はわずかながら正である。ドップラー係数の改善を考える必要がある。また、出力密度が従来の3分の1程度である。これらが結び付いてULOFやUTOP時など炉心安全特性へどう影響するか、通常運転時の制御性も含めて炉心動特性の検討が必要である。

(2)TRU含有燃料の挙動評価

TRU含有燃料については低燃焼度でも照射データが少ない。高い燃焼度までの挙動を照射試験により確認することが必要である。

(3)被覆管材料の開発

これは本炉心固有の課題ではなく、高燃焼度化のための一般的課題である。平均燃焼度20万MWd/t、高速フルエンス 6.5×10^{23} nvt、30年間使用という条件に耐える低スエリング、高クリープ強度、高耐腐食性の材料を開

発する必要がある。低スエリング、高耐Na腐食性の観点から、開発中のODS鋼等、フェライト系材料が有望と考えられる。

(4)TRU断面積の精度向上

3章に述べるように、TRU断面積に基づく炉心特性の不確かさが大きい。そのため、TRU断面積の精度向上が必要である。常陽などでのサンプル照射データの解析が待たれる。

(5)プラントシステムの検討

高発熱・高放射性のTRU燃料の取扱いを考慮し、かつ、超長寿命であること(運転中は燃料交換しないことを原則とする)を生かした燃料取扱い系やプラントシステムの検討が必要である。

3. 核断面積による炉心特性の不確かさの検討

現状ではNp,Am,CmといったTRU核種の断面積に関しては、測定データが豊富にないことからその精度はPu,Uの主要核種に比べて大幅に低いと考えられる。本章ではTRU核種の断面積不確かさによる炉心特性の不確かさを評価するとともに、炉心設計の観点から精度を向上すべき核種と反応を抽出する。対象とした炉心は、第2章で最適化された30万KWe超長寿命炉心と、TRUを5%装荷した従来型100万KWe炉心の二通りとした。尚、Pu,Uの主要核種の断面積不確かさ及び解析上の誤差はここでは扱わない。

3.1 TRU核種の断面積不確かさ

前章での炉心解析に用いた断面積ファイルJENDL-3に基づいて作成したTRU核種の7群断面積の不確かさ推定値(7)を表3.1.1に示す。TRU核種の断面積については誤差データが整備されておらず、同表の数値は測定値間のばらつきをもとにした概略推定値であることに注意する必要がある。

同表からわかるように、一般に核分裂断面積よりも捕獲断面積の方が2~3倍の不確かさがある。Pu-238も含めておおよそ捕獲断面積は20%から30%の不確かさがあると考えられる。比較的不確かさが小さいのはAm-241,Np-237の高速群核分裂断面積で10%以下となっている。

炉心特性の不確かさを評価するには、それぞれの断面積の不確かさだけでなく相関(共分散)が必要である。しかし、現状ではデータが十分整備されていない。そこで、考えられるのは核種間・反応間・エネルギー間に関してまったく相関がないとする方法であるが、これは特性の不確かさを過小評価する可能性がある。そこで、物理的に相関が生じやすいエネルギー間の相関に関しては簡易的に考慮し、核種と反応間の相関は無視する方法も用いることとし、これら二通りの方法で炉心特性の不確かさを評価することとした。どちらの方法も簡易な扱いであるが、現状の炉心特性の不確かさのめやす・判断材料とできる。表3.1.2は評価に用いたエネルギーに関する共分散マトリックスである。これはJENDL-3で評価されているPuやUの共分散マトリックスを参考にして保守的に設定した仮想的なものである。これを各核種・各反応に対して共通に用いた。

表3.1.1 TRU(Np,Am,Cm)断面積誤差の推定値(7) (1σ レベル)

群	エネルギー 範囲	Np237		Pu238		Am241		Am242m	
		Capt.	Fis.	Capt.	Fis.	Capt.	Fis.	Capt.	Fis.
1	10MeV-1.4MeV	50	5	60	10	60	7	50	5
2	-0.4	20	5	30	10	30	7	30	10
3	-86 keV	20	10	30	10	15	7	30	10
4	-9.2	10	20	20	10	15	7	30	20
5	-960 eV	10	20	20	20	10	10	30	20
6	-100 eV	5	50	7	20	15	20	30	25
7	- th.	3	10	7	5	7	20	20	20

群	エネルギー 範囲	Am243		Cm242		Cm243		Cm244	
		Capt.	Fis.	Capt.	Fis.	Capt.	Fis.	Capt.	Fis.
1	10MeV-1.4MeV	60	5	60	15	60	15	60	15
2	-0.4	30	10	30	10	30	10	30	10
3	-86 keV	30	10	30	10	30	10	30	10
4	-9.2	20	30	30	10	30	10	30	15
5	-960 eV	10	30	30	10	30	10	20	15
6	-100 eV	10	20	20	20	30	30	20	20
7	- th.	10	20	20	10	20	20	20	20

表3.1.2 想定したTRU断面積の共分散マトリックス

群	1	2	3	4	5	6	7
1 (10MeV~1.35MeV)	1.0	0.7	0.5	0.3			
2 (1.35MeV~0.39MeV)	0.7	1.0	0.7	0.5	0.3		
3 (0.39MeV~86.5KeV)	0.5	0.7	1.0	0.7	0.5	0.3	
4 (86.5KeV~9.12KeV)	0.3	0.5	0.7	1.0	0.7	0.5	0.3
5 (9.12KeV~961eV)		0.3	0.5	0.7	1.0	0.7	0.5
6 (961eV~101eV)			0.3	0.5	0.7	1.0	0.7
7 (101eV以下)				0.3	0.5	0.7	1.0

注)空欄は0

3.2 炉心特性に対する断面積感度の評価

断面積不確かさによる炉心特性への影響評価のために、炉心特性に対する断面積感度係数の評価を行った。

(1) 計算手法

断面積の感度係数は7群二次元RZモデルに基づき、直接計算即ち、各断面積を特定量(ここでは20%とした)だけ変化させた場合の実効増倍率の変化から評価した。7群断面積は2章で作成したものと同一とした。

以下で示す感度係数の定義は次のとおりである。

$$S_{i,x,r} = (C_{i,x,r} - C_0) / [C_0 \times (\Delta\sigma/\sigma)_{i,x,r}]$$

$S_{i,x,r}$: 核種 x 、反応 r 、エネルギー群 i の感度係数

$C_{i,x,r}$: 核種 x 、反応 r 、エネルギー群 i の断面積を変化させた場合の特性値

C_0 : 基準特性値

$(\Delta\sigma/\sigma)_{i,x,r}$: 核種 x 、反応 r 、エネルギー群 i の断面積変化量(=20%)

感度係数は基準特性値 C_0 で規格化しているが、この C_0 が負の場合は感度係数の符号に注意する必要がある。尚、計算対象とした特性は実効増倍率、燃焼反応度変化、出力分布、TRUインベントリ変化、Naボイド反応度である。特性によっては、対象とした核種を寄与の大きいNp-237, Am-241, Am-243とNp-237から生じるPu-238に限定した。

(2) 30万KWe超長寿命炉心の感度係数計算結果

以下に主な感度係数をグラフ化して示す。感度係数の詳細な数値とその他の感度係数については、解析報告書(7)参照。尚、感度係数は該当エネルギー範囲での積分値である。

a. 初期の実効増倍率

初期の実効増倍率に対する感度係数を図3.2.1に示す。装荷量の多い順即ちNp-237, Am-241, Am-243の順で感度が高い。群別にみるとどの核種とも、捕獲では3,4群(400keV~9.2keV)、核分裂では1,2群(400keV以上)の感度が高い。

b. 燃焼反応度変化

炉心の反応度は、2章の図2.3.3に示すように中期(約17年後)までは増大し、それ以降は減少しており中期までと末期までは傾向が異なる。そ

ここで、反応度変化の感度係数は中期までの反応度変化と、末期までの反応度変化のふたとおり求めた。

中期までの反応度変化に対する感度係数を図3.2.2に、末期までの反応度変化に対する感度係数を図3.2.3に示す。ここで、両者の符号が異なるのは、基準となる反応度変化が中期までが $+1.1\% \Delta\rho$ 、末期までが $-2.5\% \Delta\rho$ と符号が異なるためである。(この反応度変化量は2章図2.3.3に示す反応度変化量とは一致しないが、これは感度係数を求めた燃焼計算では計算時間節約のため時間ステップを減らしたため差がでたものである)

Np-237,Am-241の他にNp-237から生成するPu-238の核分裂断面積の1,2,3,4群(9.2keV以上)の感度が大きい。感度係数は大きいもので100%もあり、大きいことがわかる。

c. 出力分布

出力分布への感度係数は、初期における内/外炉心のそれぞれの最大出力密度について求めた。本炉心では内/外炉心のTRU装荷割合が異なるため、内/外炉心の出力への感度は重要な量である。初期の最大出力密度への感度係数を図3.2.4(内側炉心)、図3.2.5(外側炉心)に示す。

これらの表からTRU核分裂断面積の感度が非常に大きいことがわかる。初期において、TRUは外側炉心に多く含まれているため、核分裂断面積の感度係数は内側炉心で負、外側炉心で正となる。

d. TRUインベントリ変化

TRU全体(Puは除くNp,Am,Cm)のインベントリ変化に対する感度係数を図3.2.6に示す。定義は、重量の末期と初期の差に対する感度である。TRU全体のインベントリ変化に対する感度係数のもっとも大きいNp-237の捕獲を例にとると以下ようになる。感度係数の全群の和は約17%、即ち、全群で捕獲断面積が2倍に増加するとTRUインベントリの末期と初期の差は17%増加する。末期と初期の差はもともと負であるから、その絶対値が17%増大する、即ち消滅量が17%増加することになる。断面積の変化の割には消滅量が変化しないが、これは消滅量が増えインベントリが減少すると逆に消滅量も抑制されるというフィードバック効果と考えられる。捕獲により他のTRUになる場合は感度を持たないことになるが、それでも捕獲断面積の感度が大きくなっており、消滅は主として捕獲により行われることを反映している。

e. Naボイド反応度

初期炉心のNaボイド反応度に対する感度係数を図3.2.7に示す。§3.1で示したように捕獲断面積の不確かさが大きいことを考えあわせる

と、Naボイド反応度の不確かさには捕獲断面積の不確かさが大きく寄与することがこの表よりわかる。尚、感度が小さい場合、0.202%の倍数となっているのは実効増倍率の収束条件からきており有効けたは1けたと考えるのが妥当である。(1%を越える場合でも2けたである)

Np-237,Am-241等の高速群(1群)の核分裂断面積は感度係数が負であり、直観と異なる。この理由を以下に推定する。本炉心ではTRU装荷割合が多くその断面積の変化が全体のスペクトルに与える影響が大きい。1群の核分裂断面積を増加した場合、1群のスペクトルは相対的に減少する。これによる反応度減少効果が核分裂断面積の増加効果に勝ったためと考えられる。

(3)100万KWe大型炉心(5%TRU)の感度係数計算結果

以下に主な感度係数をグラフ化して示す。感度係数の詳細な数値とその他の感度係数については、解析報告書(7)参照。尚、感度係数は該当エネルギー範囲での積分値である。

炉心仕様と主要特性は付録に示した。

- | | |
|----------------------------|---------|
| ●実効増倍率(初期)に対する断面積感度係数 | 図3.2.9 |
| ●燃焼反応度変化に対する断面積感度係数 | 図3.2.10 |
| ●内側炉心最大出力密度(初期)に対する断面積感度係数 | 図3.2.11 |
| ●外側炉心最大出力密度(初期)に対する断面積感度係数 | 図3.2.12 |
| ●TRUインベントリ変化に対する断面積感度係数 | 図3.2.13 |
| ●ドップラー係数(初期)に対する断面積感度係数 | 図3.2.14 |
| ●Naボイド反応度(初期)に対する断面積感度係数 | 図3.2.15 |

ドップラー係数については、自己遮蔽因子の不確かさは考慮されていないことに注意。

30万KWe超長寿命炉心の場合と比べると、TRU装荷割合が4分の1なので感度係数の絶対値が小さいこと、相対的に捕獲断面積の感度係数が核分裂断面積の感度係数よりも大きいことが特徴である。例えば、実効増倍率や燃焼反応度変化に対するNp-237やAm-241の感度係数をみると、30万KWe超長寿命炉心では核分裂断面積の感度が捕獲断面積の感度に匹敵する大きさであるのに対して、本炉心では明らかに捕獲断面積の感度の方が2倍から数倍大きい。(但し、燃焼反応度変化に対するPu-238の核分裂断面積の感度は非常に大きい。)

これは、本炉心に比べて30万KWe超長寿命炉心でこれらの核種の高速核分裂が炉心特性へ大きく寄与していることを示している。逆に本炉心ではこれらの核種の捕獲断面積が炉心特性を左右している。このことは出力分布の感度係数へさらに鮮明に反映されている。30万KWe超長寿命炉心では核分裂断面積の感度の方が数倍大きい、本炉心では捕獲断面積の感度の方が数倍大きい。これらの理由は、30万KWe超長寿命炉心のTRU割合が大きいので(20%)、5%TRU大型高速炉に比べて非常にスペクトルが硬化しているためと考えられる。

核種ごとの感度係数では、やはり装荷量を反映して初期の特性についてはNp-237,Am-241,Am-243の順で感度が大きい。燃焼反応度変化についてはPu-238の核分裂断面積の感度が非常に大きい。

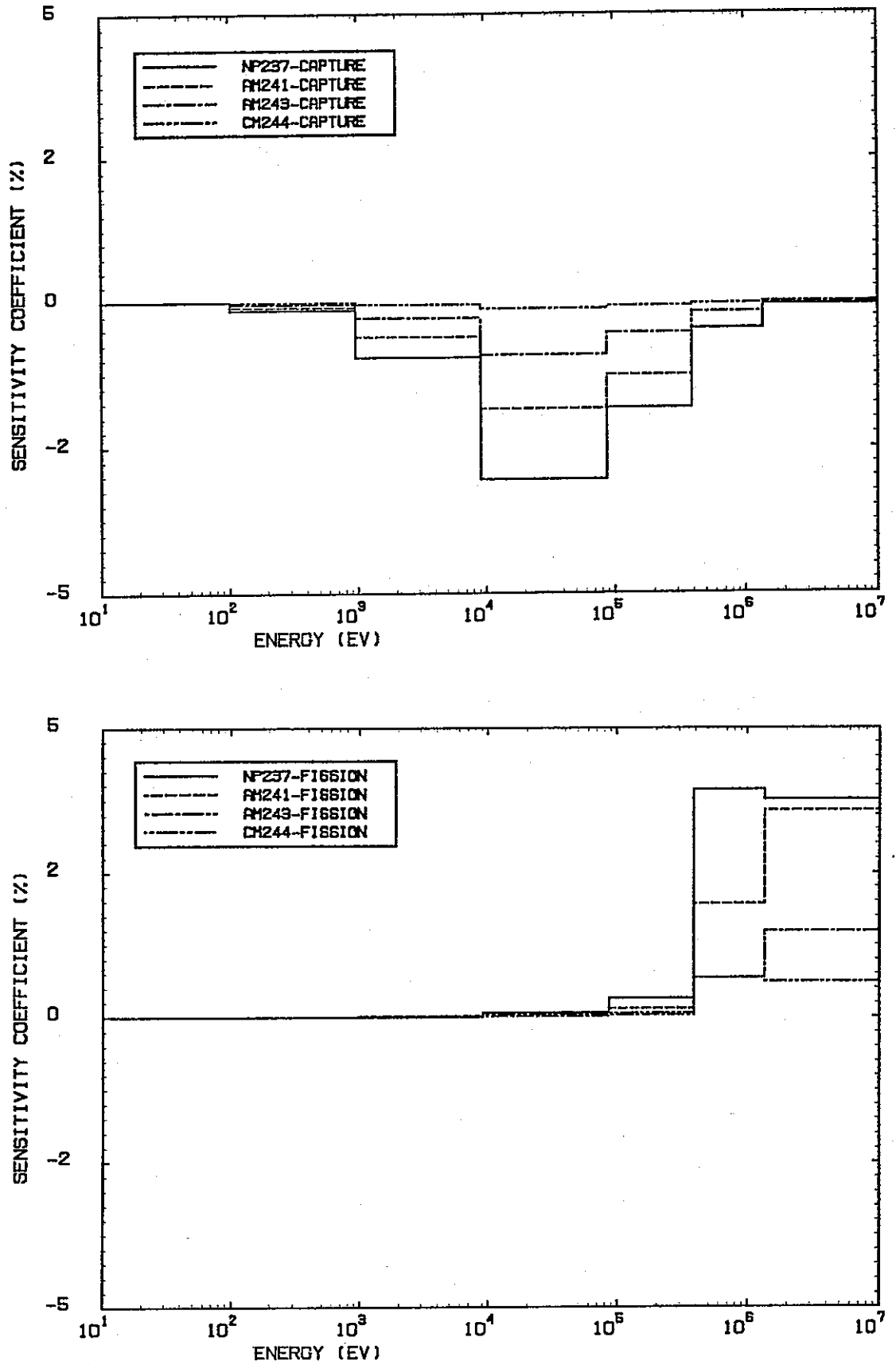


図3.2.1 実効増倍率(初期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)

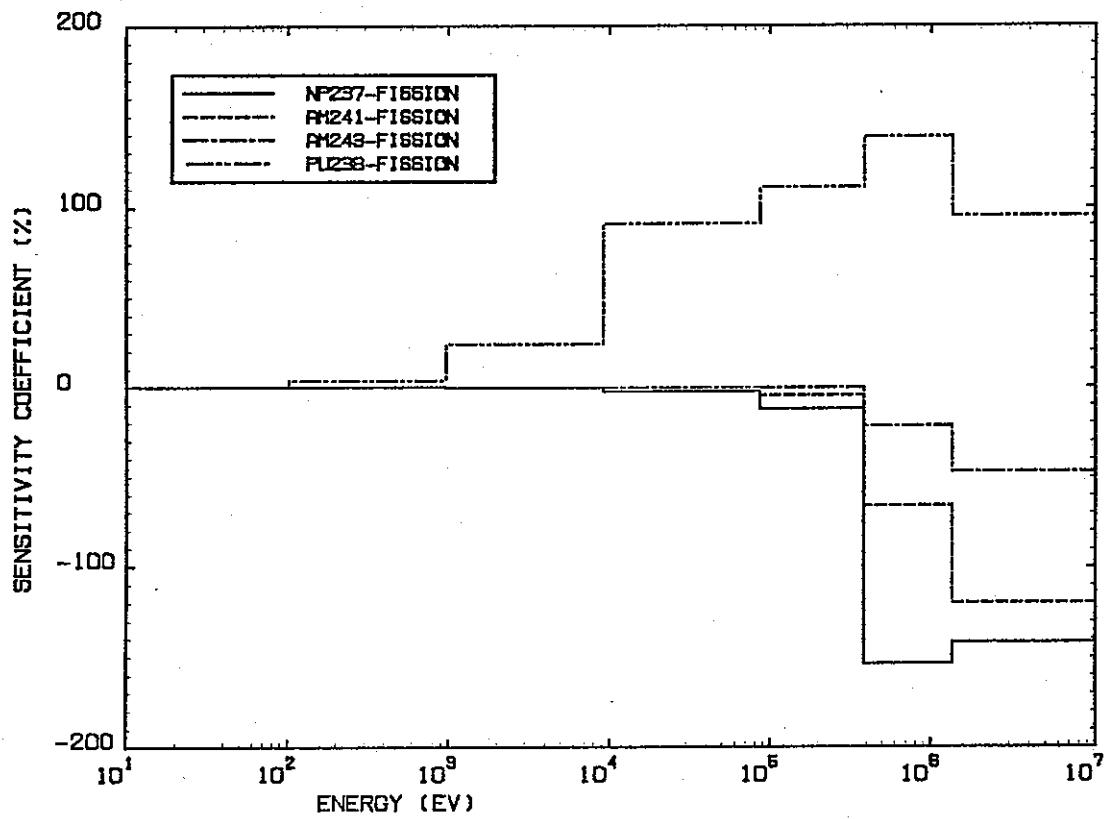
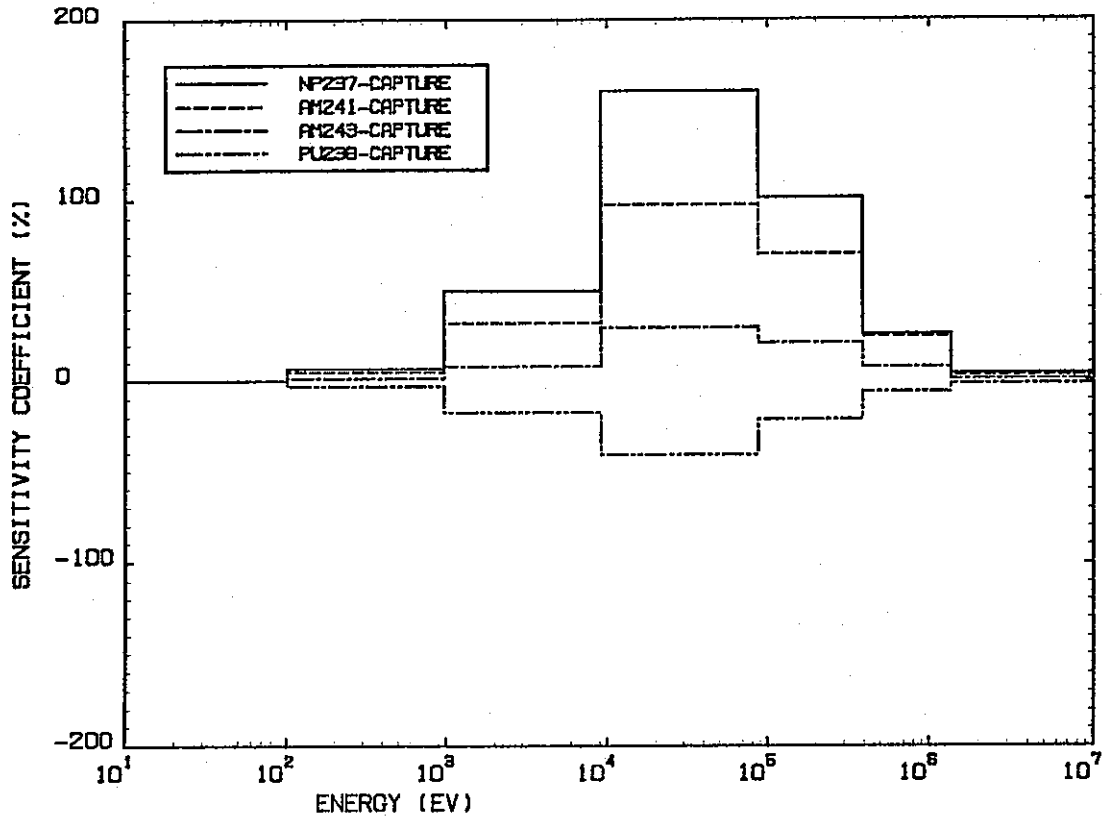


図3.2.2 燃焼反応度変化量(初期から中期)に対するTRU断面積の感度係数 (超長寿命炉心)

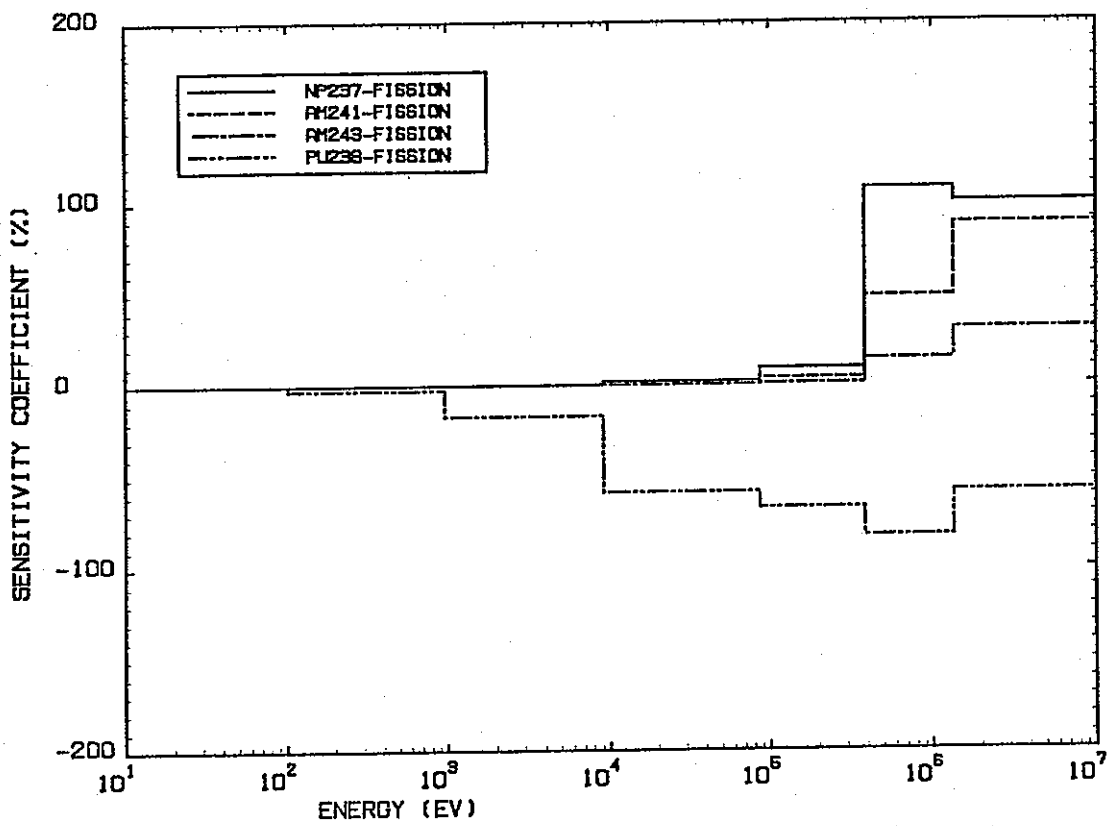
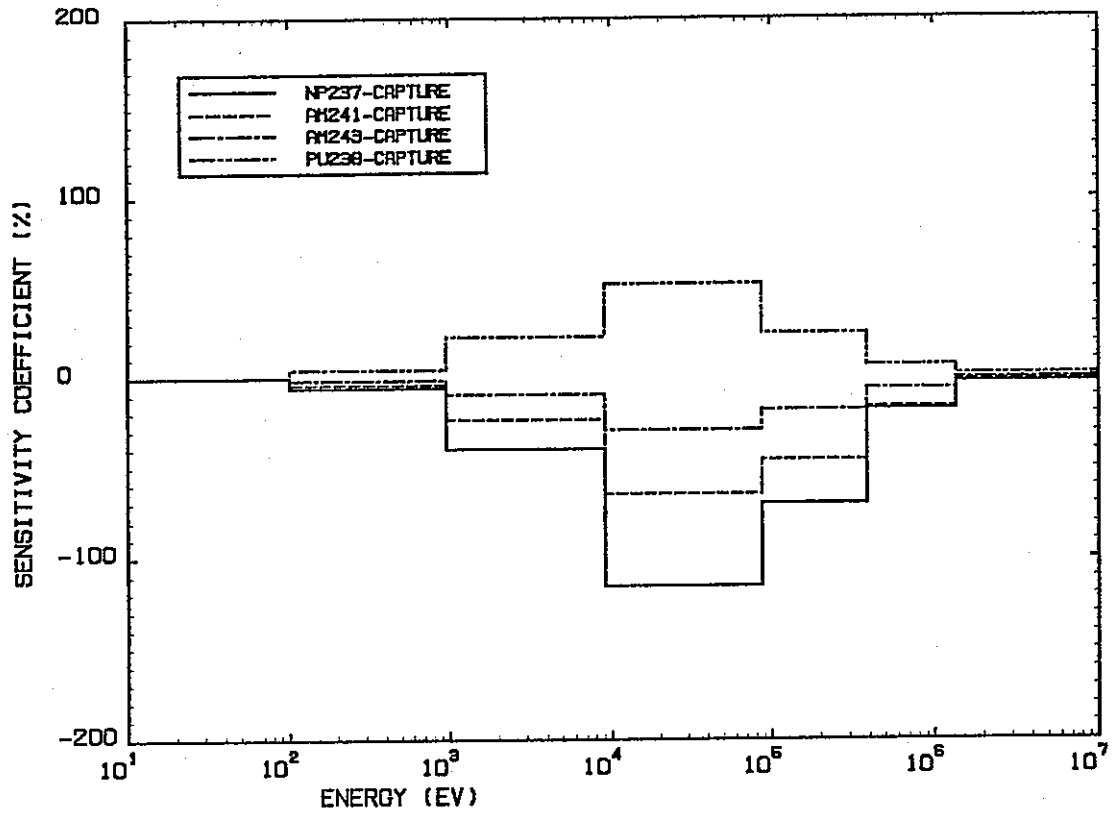


図3.2.3 燃焼反応度変化量(初期から末期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)

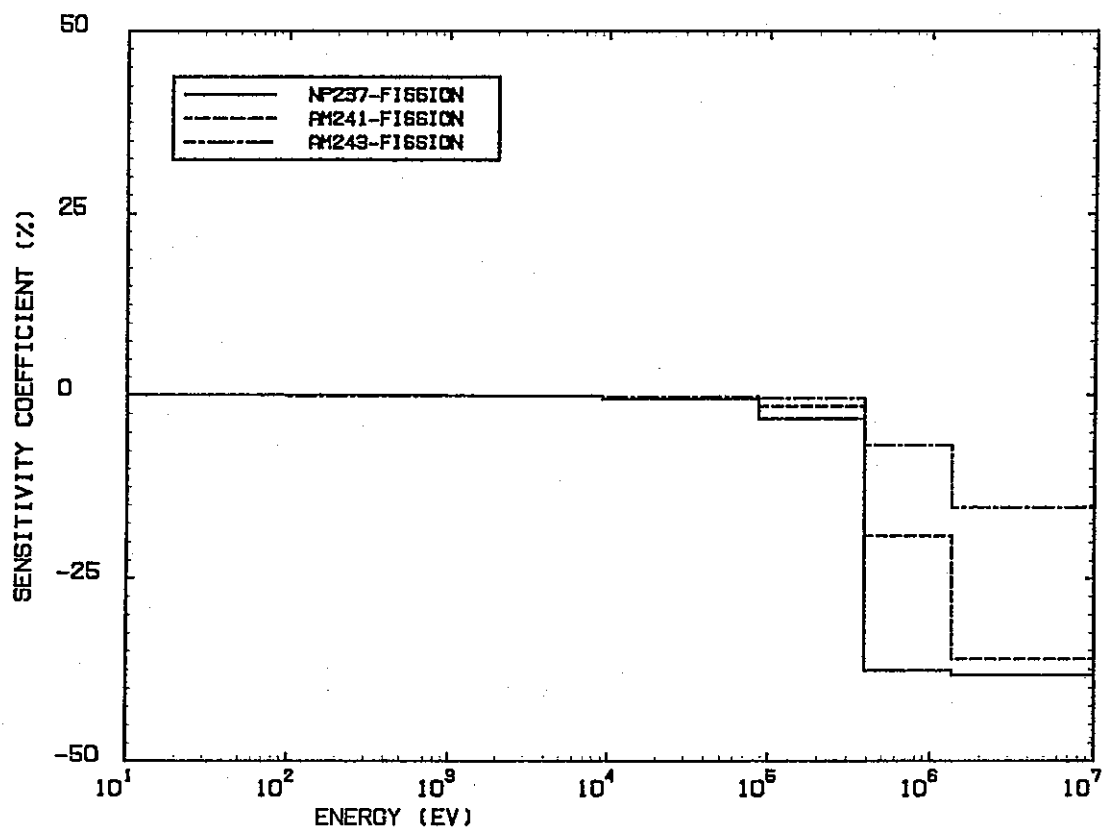
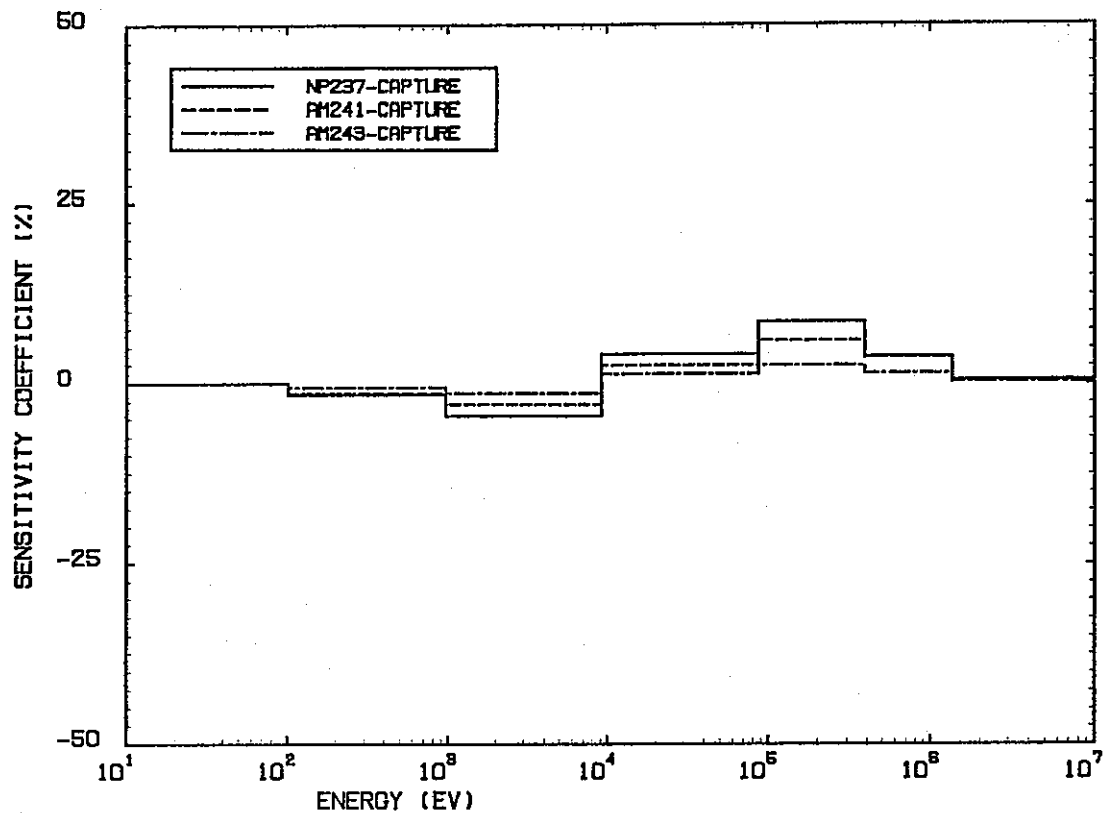


図3.2.4 内側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)

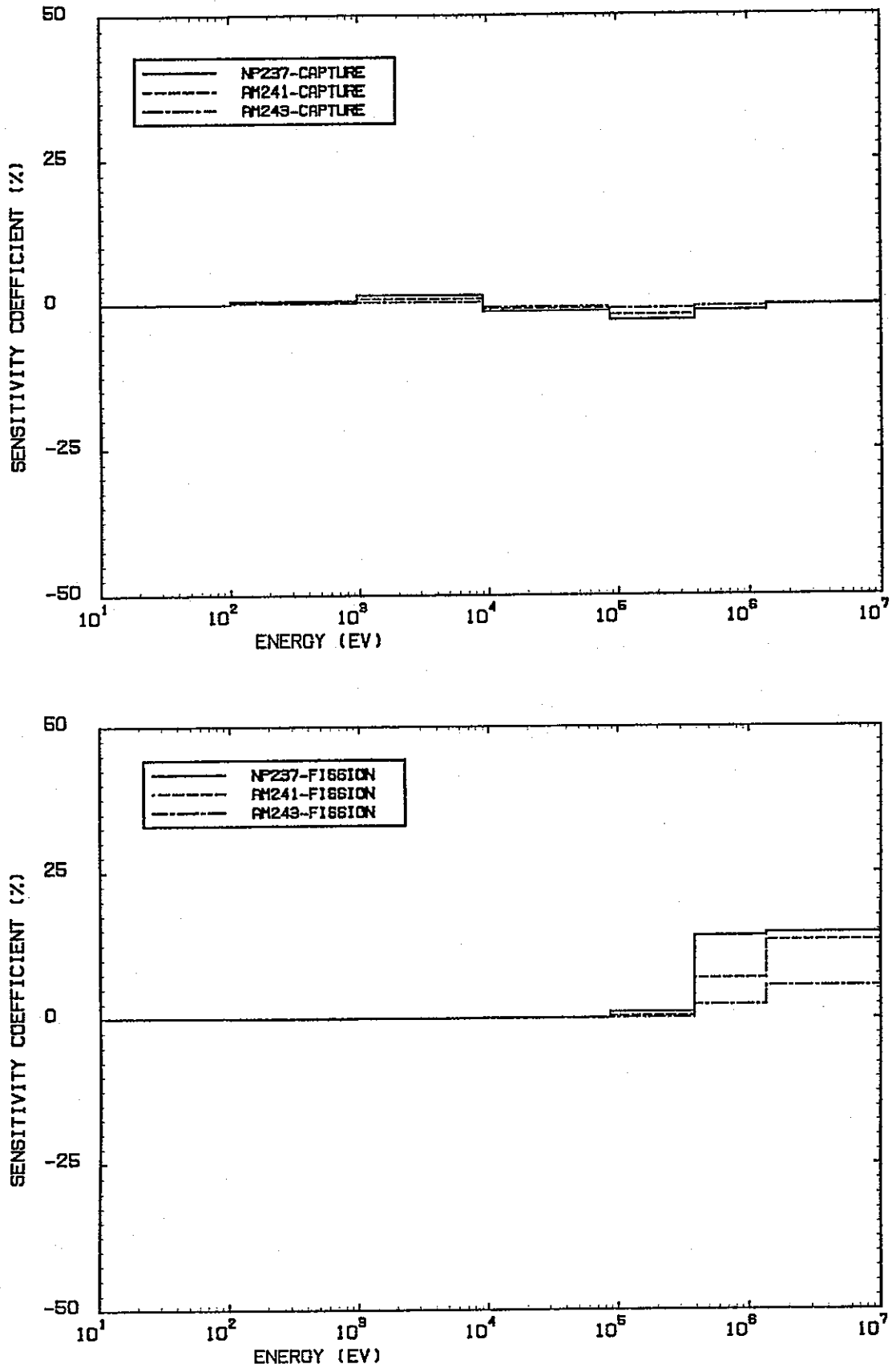


図3.2.5 外側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数
(超長寿命炉心)

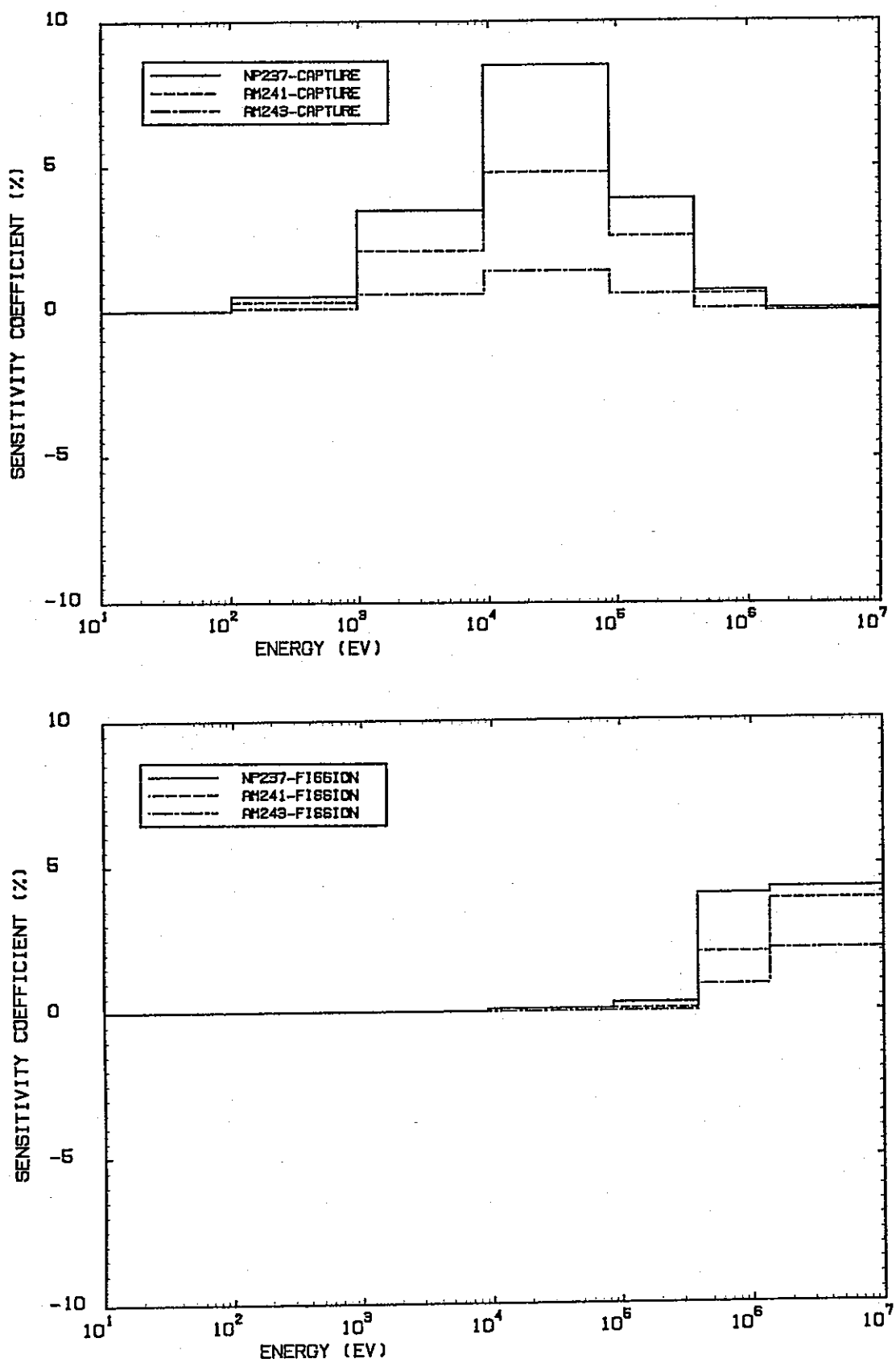


図3.2.6 TRU消滅量(寿命中、増大を正とする)に対するTRU断面積の感度係数(超長寿命炉心)

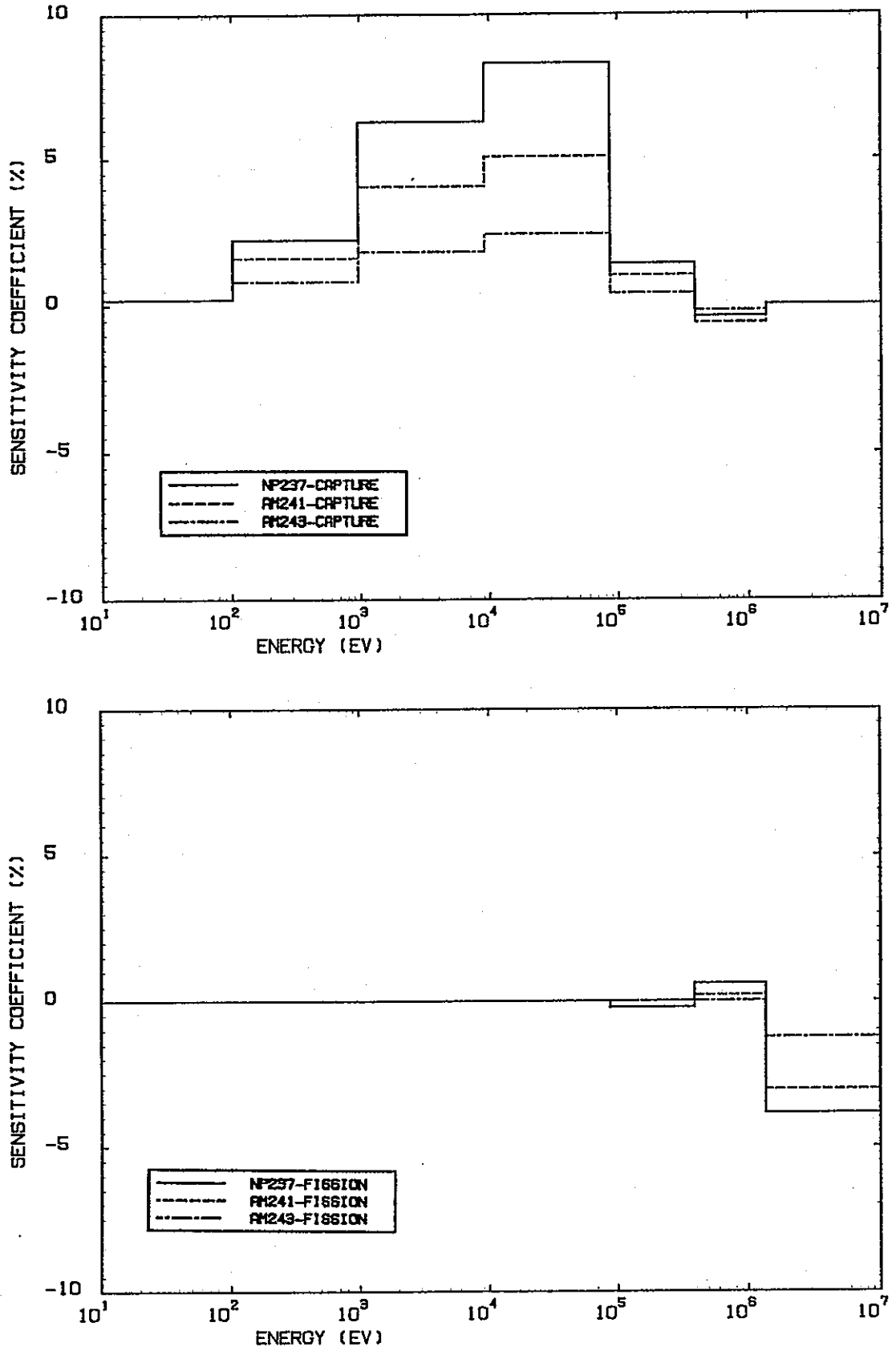


図3.2.7 Naボイド反応度(初期)に対するTRU断面積の感度係数 (超長寿命炉心)

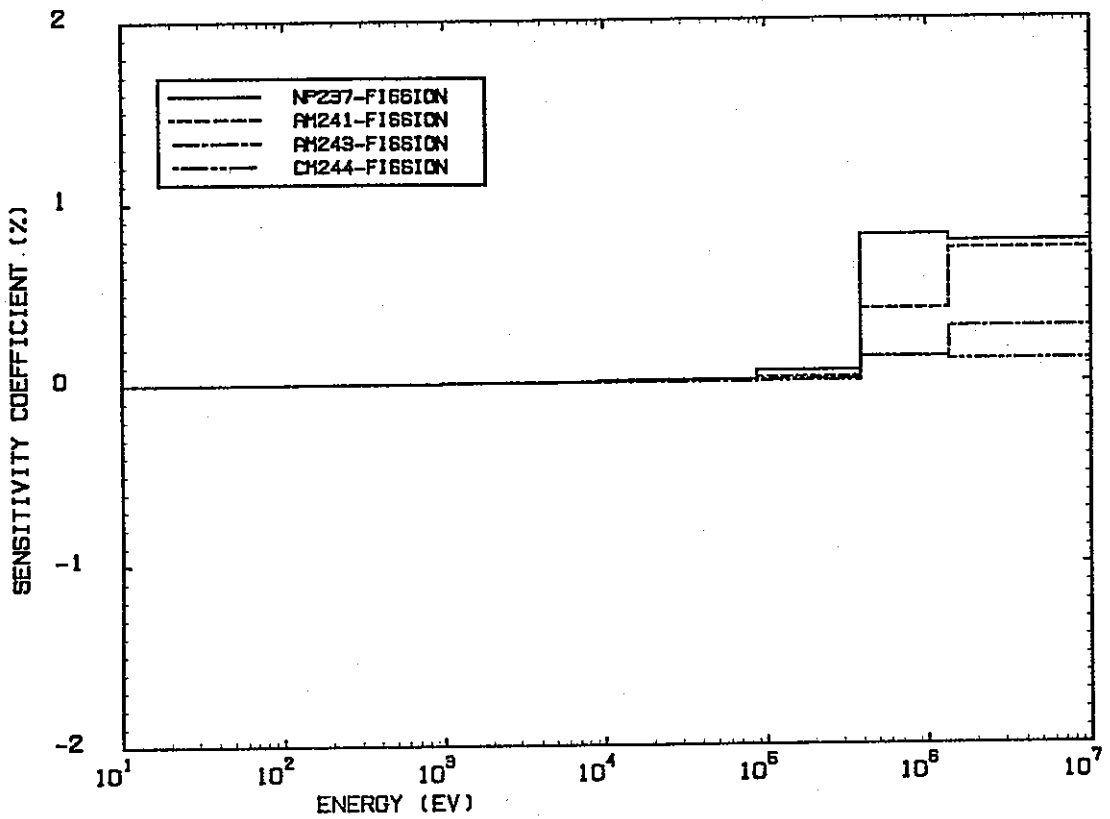
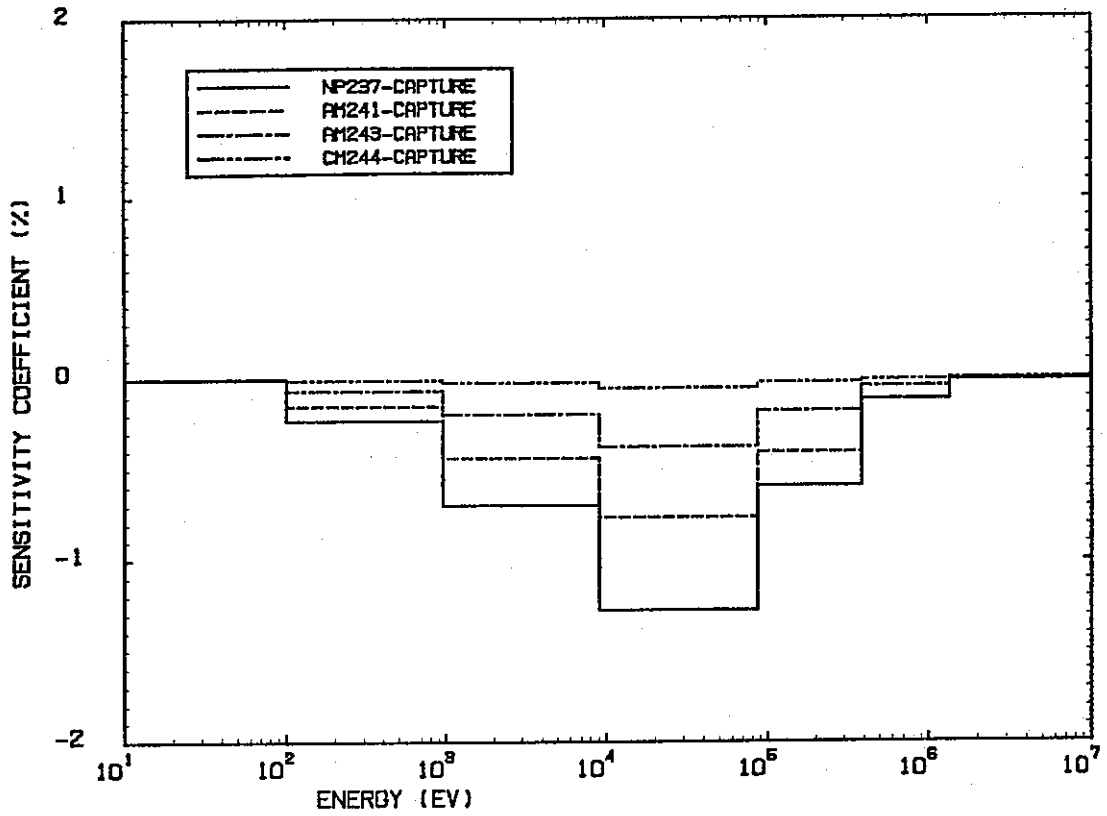


図3.2.8 実効増倍率(初期)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

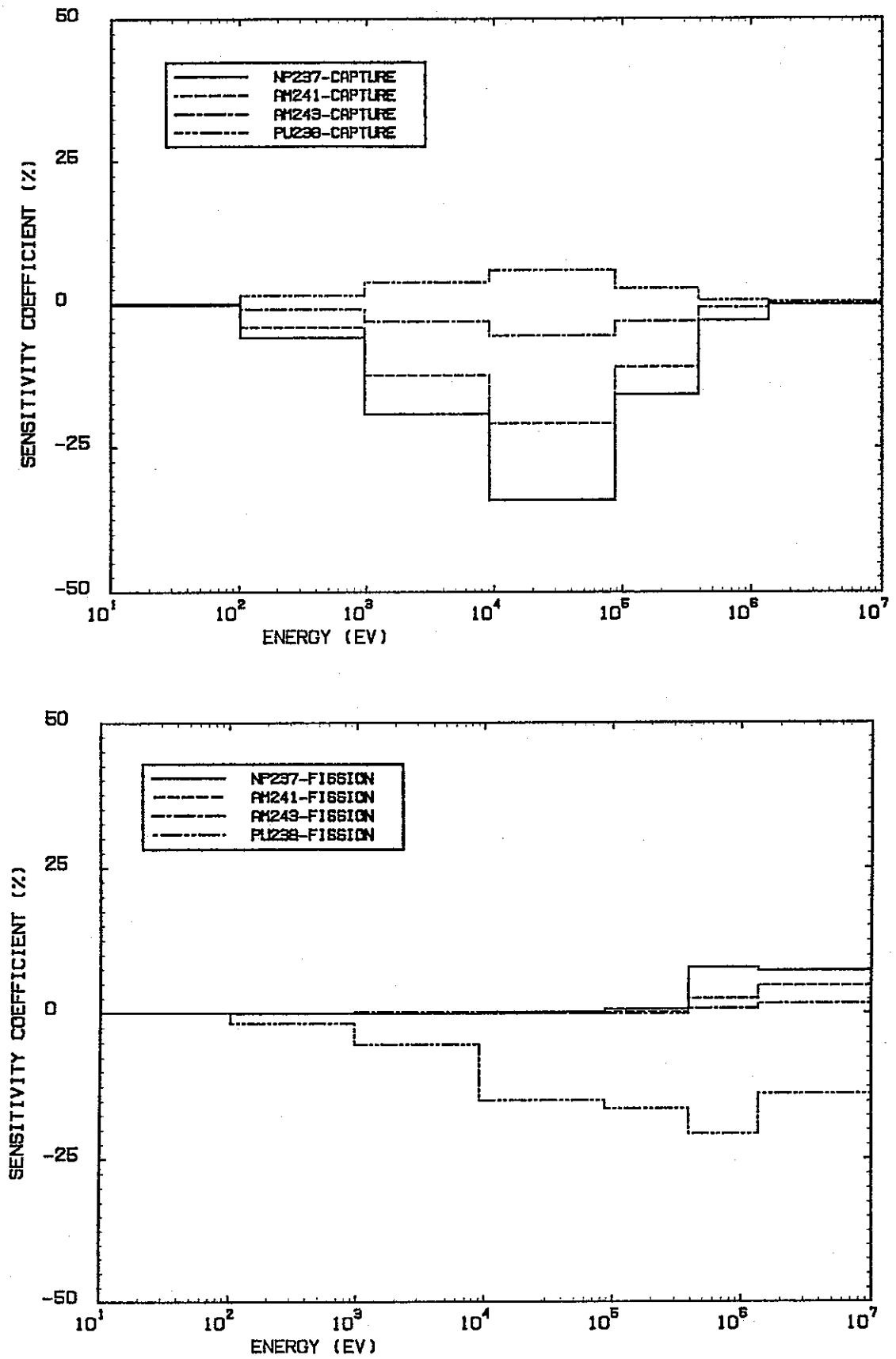


図3.2.9 燃焼反応度変化量(1サイクル)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

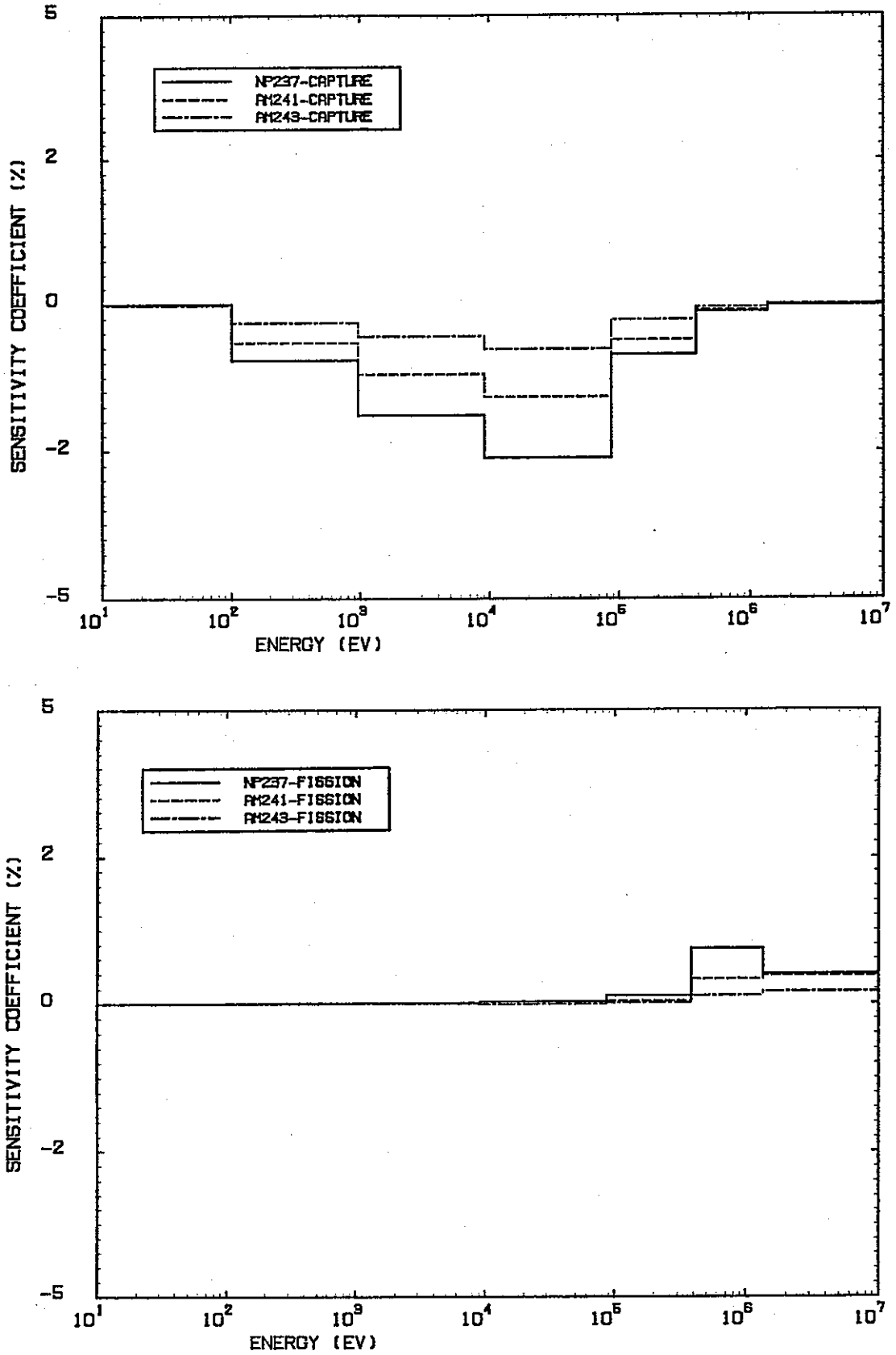


図3.2.10 内側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

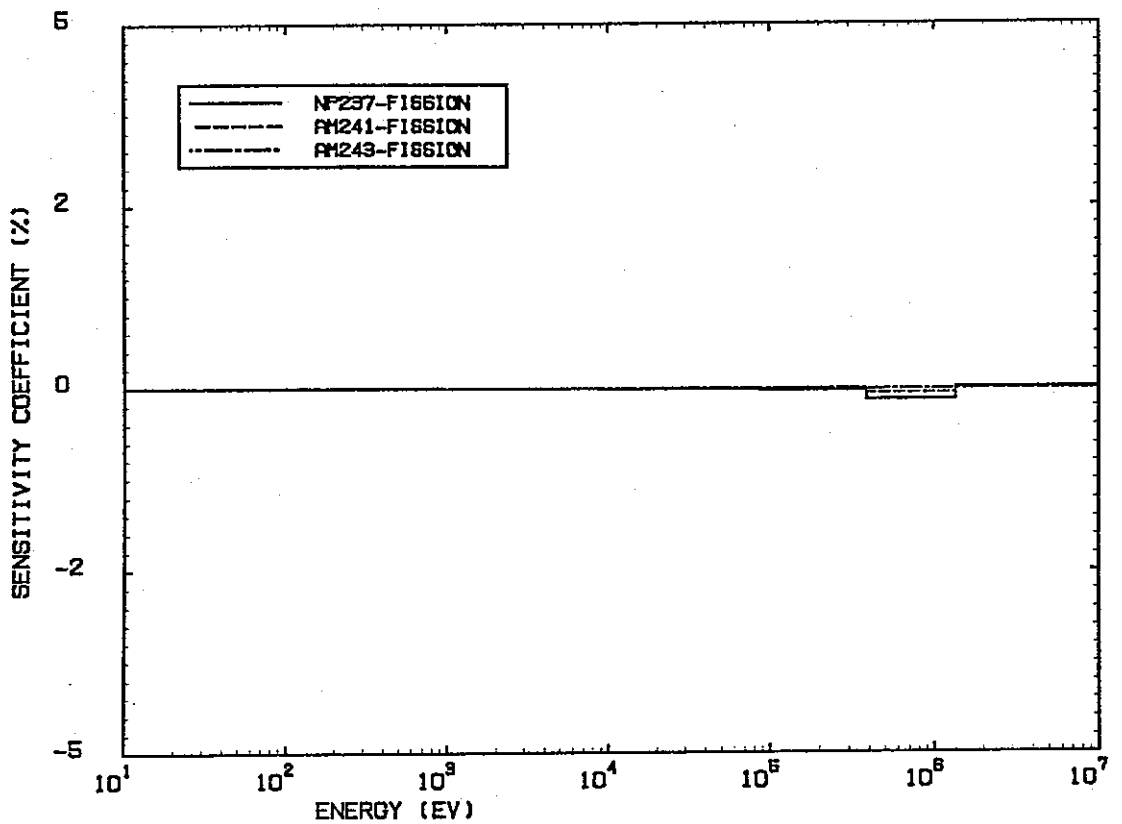
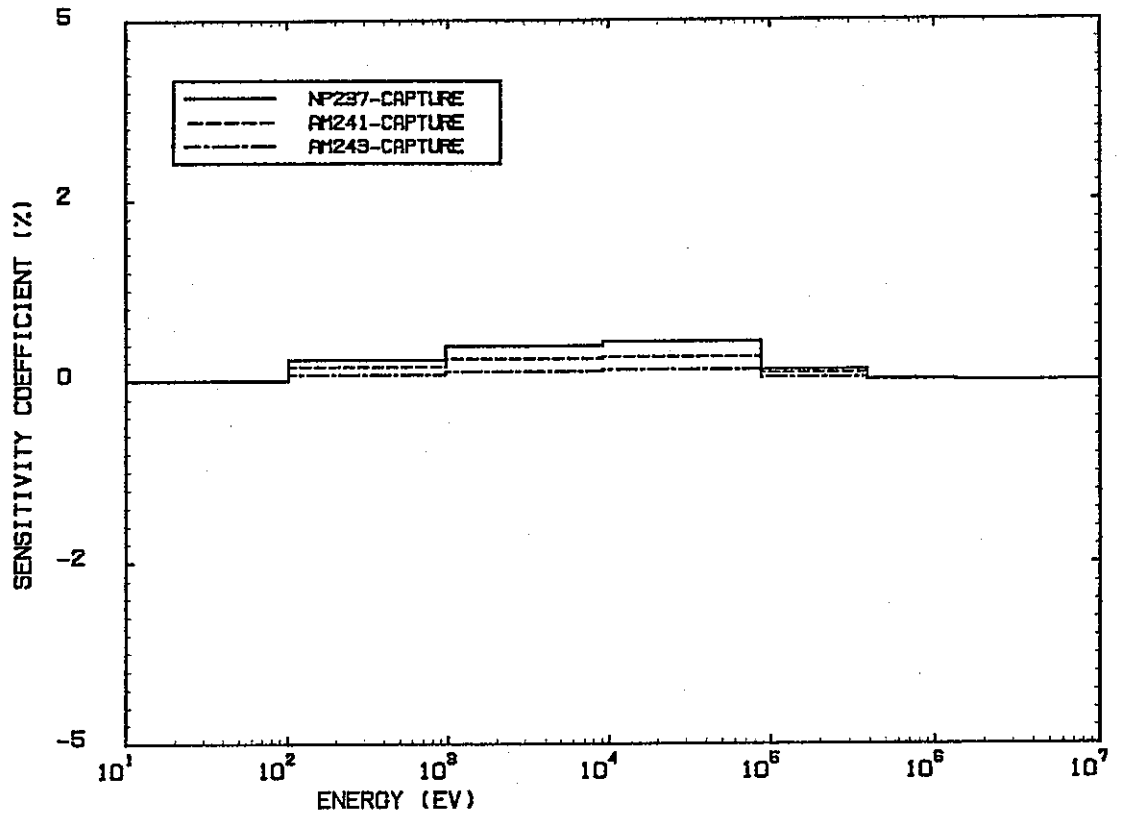


図3.2.11 外側炉心の最大出力密度(初期)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

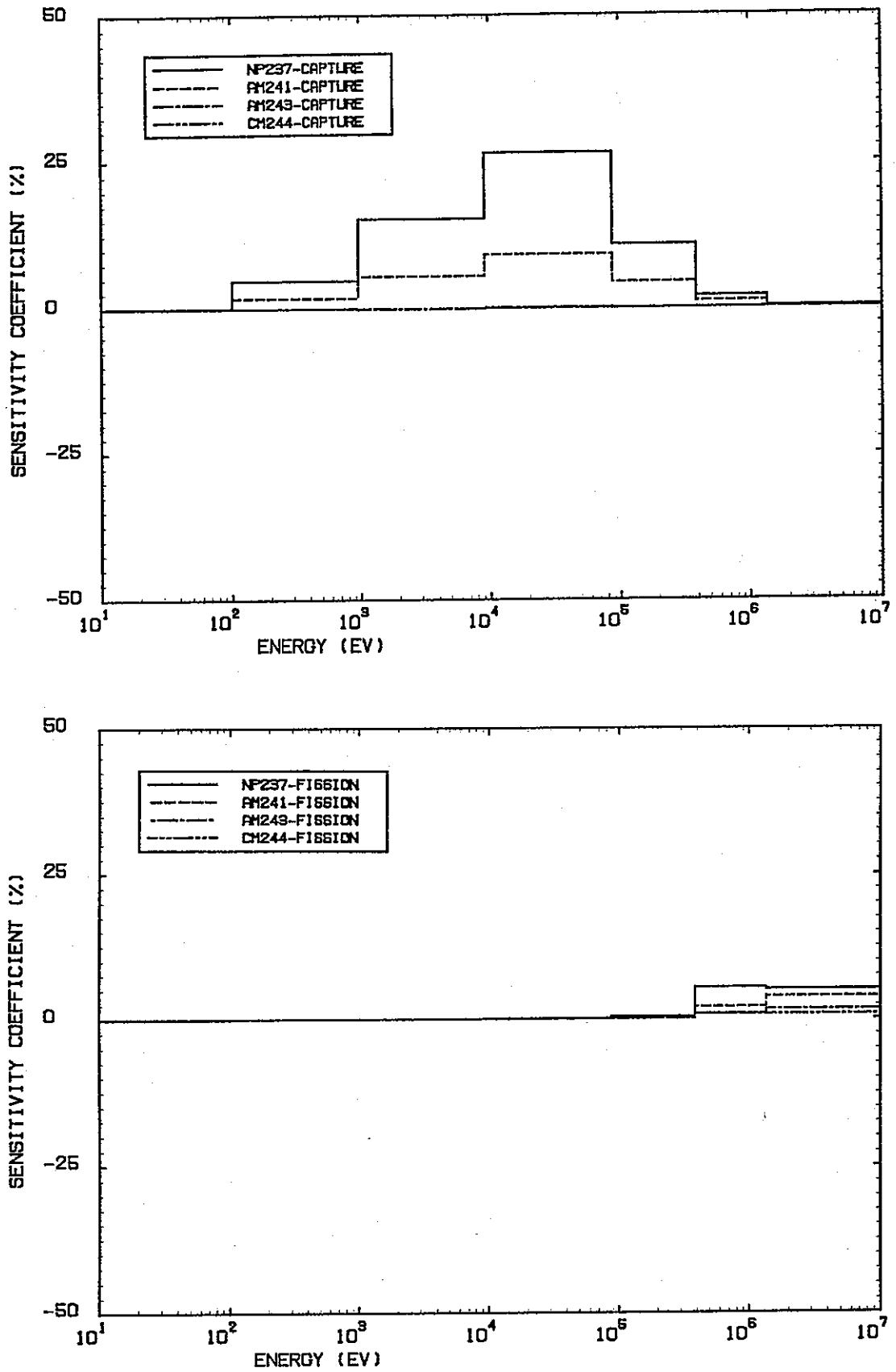


図3.2.12 TRU消滅量(1サイクル、増大を正とする)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

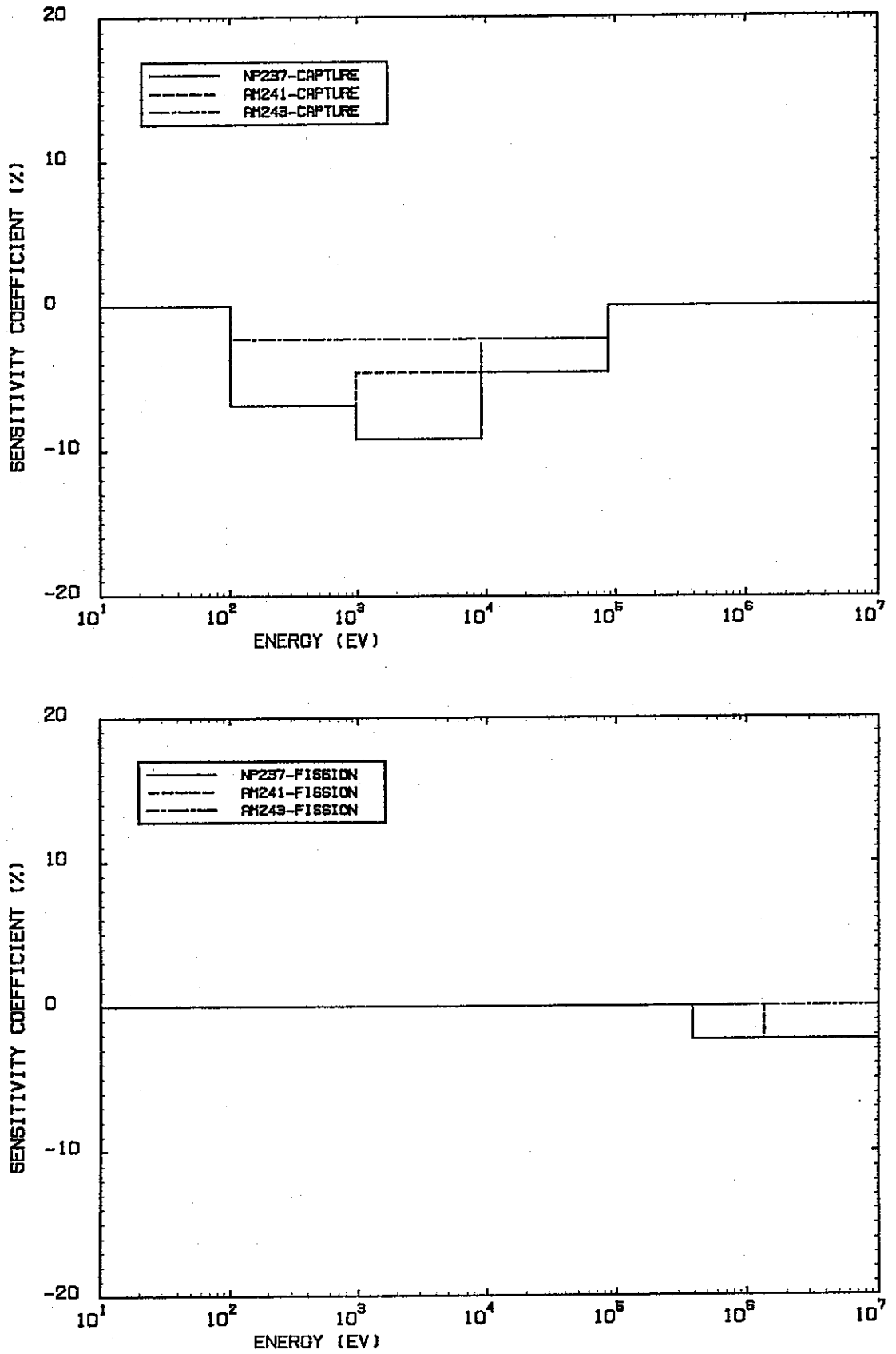


図3.2.13 ドップラー係数(初期)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

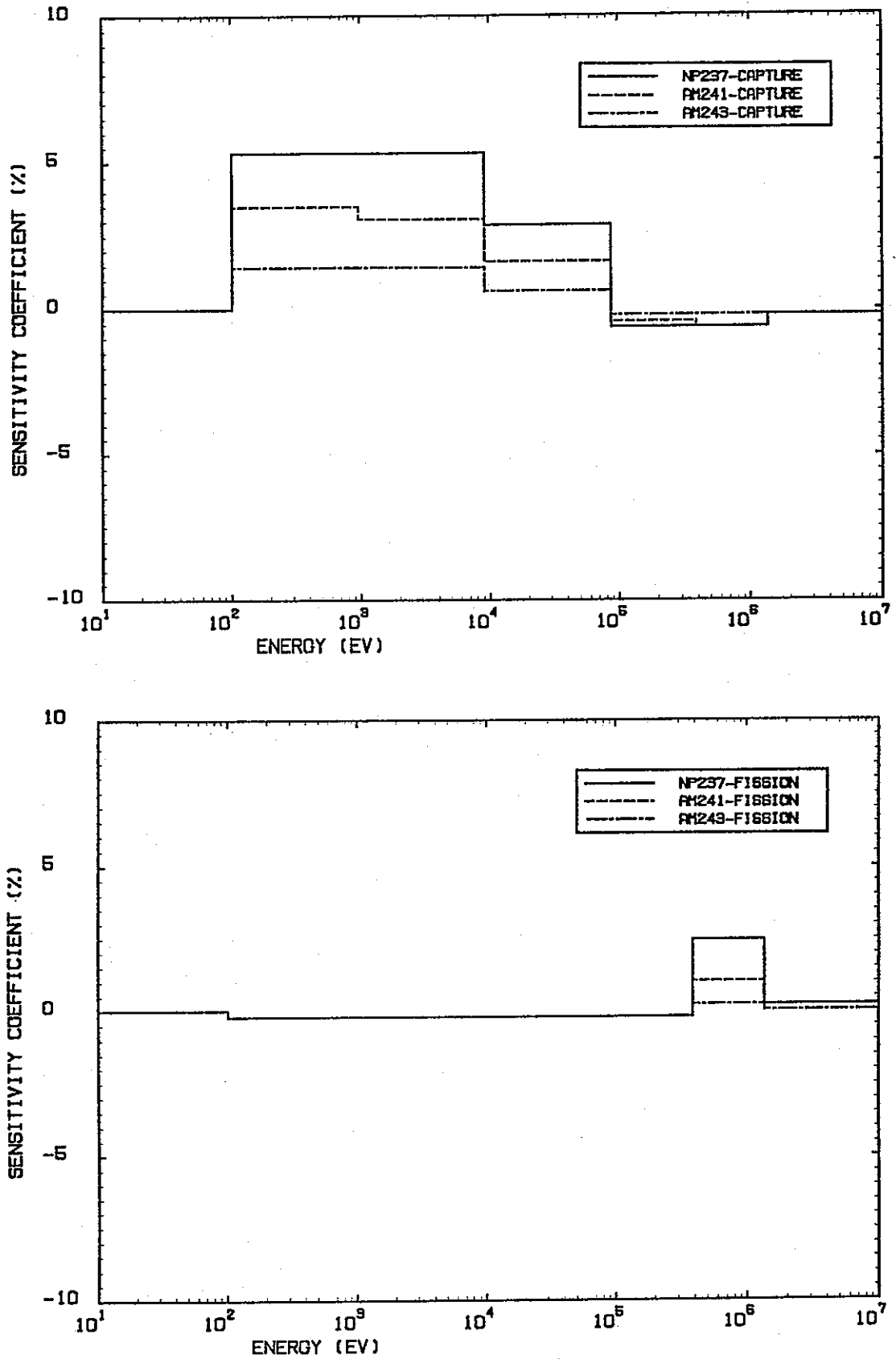


図3.2.14 Naボイド反応度(初期)に対するTRU断面積の感度係数 (TRU5%-1000MWe炉心)

3.3 炉心特性の不確かさ評価

(1) 評価方法

炉心特性の不確かさは、§3.1の断面積不確かさと§3.2の感度係数から評価することができる。但し、各反応、各核種、各エネルギーについての断面積の相関に関しては情報がほとんどないこともあり、簡易的な扱いを行って、概略の炉心特性の不確かさを求めることとする。また、反応については、核分裂と捕獲しか扱わない。

ここでは各反応、各核種、各エネルギーの断面積不確かさが全て無相関(統計的に完全にばらついている)の場合と、エネルギーに関しては相関があり核種及び反応間では無相関の2ケースについて炉心特性の不確かさを求めることとした。エネルギーに関する相関は表3.1.2に示した共分散マトリックスで表されるとした。

以下では、炉心特性の不確かさ1と2とを以下のように定義して結果をまとめる。

- 不確かさ1 各断面積不確かさはエネルギーに関してのみ相関あり、他に関しては完全無相関
- 不確かさ2 各断面積不確かさは完全無相関

(2) 30万KWe超長寿命炉心の評価結果

30万KWe超長寿命炉心の炉心特性の不確かさを表3.3.1にまとめた。また、各反応、各核種ごとの不確かさへの寄与を表3.3.2(不確かさ1)と表3.3.3(不確かさ2)に示す。すべて不確かさは相対値である。これらの2乗和の平方根が全体での不確かさとなる。これらの表では、実効増倍率とNaボイド反応度以外は寄与の大きいNp-237, Am-241, Am-243, Pu-238の寄与しか考慮していない。

注意すべきことは、出力分布・ドップラー係数・Naボイド反応度の不確かさは初期炉心に対してのものであり、燃焼による組成変化をも含めたこれらの特性変化の不確かさは別途評価が必要である。

a. 実効増倍率の不確かさ(初期)

不確かさ1, 2はそれぞれ約1.4%、約0.8%である。これは調整炉定数を用いた現状の大型炉設計予測精度(解析誤差を含む)と比べ非常に大きい。(例えば、炉定数調整法による電力60万KWe炉心の実効増倍率不確かさは約0.4% Δk である(14)。) Np-237, Am-241の捕獲断面積の寄与がもつ

とも大きい。ついでNp-237,Am-241の核分裂断面積、Am-243の捕獲断面積も寄与が大きい。

b. 反応度変化の不確かさ

初期から中期にかけての反応度変化について、不確かさ1,2はそれぞれ約72%、約45%である。初期から末期にかけての反応度変化については、中期から反応度変化が逆方向となり不確かさが打ち消し合うためあまり大きくなり、不確かさ1,2はそれぞれ約52%、約33%である。これを絶対値にすると、初期から末期にかけてのノミナル反応度変化は約 $2.5\% \Delta\rho$ なので、不確かさ1,2はそれぞれ約 $1.8\% \Delta\rho$ 、約 $1.1\% \Delta\rho$ である。反応度変化がもともと小さく抑えられていることもあるが、不確かさの比率が非常に大きい。この不確かさは従来炉の現状不確かさと比べてかなり大きい。寄与が大きいものは、Np-237,Am-241の捕獲断面積とPu-238の核分裂断面積である。

c. 最大出力密度の不確かさ

初期炉心でのみ評価した。内側炉心の最大出力密度の不確かさ1,2はそれぞれ約6.9%、約4.9%である。また、外側炉心の最大出力密度の不確かさ1,2はそれぞれ約2.5%、約1.7%である。炉定数調整法による電力60万KWe炉心の出力密度不確かさは約2%前後である(14)ことを考えると非常に大きい。Np-237,Am-241の核分裂断面積・捕獲断面積の寄与が大きい。

d. TRUインベントリ変化の不確かさ

Np,Am,Cm全体のインベントリ変化(初期から末期まで)の不確かさ1,2はそれぞれ約2.8%、約1.6%である。Np-237,Am-241の捕獲断面積の寄与が大きい。TRU消滅量の不確かさはそれほど大きくないといえる。

e. Naボイド反応度不確かさ

初期のNaボイド反応度について、不確かさ1,2はそれぞれ約2.5%、1.6%である。(相対誤差) Np-237,Am-241,Am-243の捕獲断面積の寄与が大きい。従来炉のNaボイド反応度の不確かさから比べると、この不確かさの絶対値は小さいといえる。

(3)100万KWe大型炉心(5%TRU)の評価結果

100万KWe大型炉心(5%TRU)の炉心特性の不確かさを表3.3.4にまとめた。また、各反応、各核種ごとの不確かさへの寄与を表3.3.5(不確かさ1)と表3.3.6(不確かさ2)に示す。すべて不確かさは相対値である。これらの2乗和の平方根が全体での不確かさとなる。これらの表では、実効増倍率とNa

ボイド反応度以外は寄与の大きいNp-237,Am-241,Am-243,Pu-238の寄与しか考慮していない。

注意すべきことは、出力分布・ドップラー係数・Naボイド反応度の不確かさは初期炉心に対してのものであり、燃焼による組成変化をも含めたこれらの特性変化の不確かさは別途評価が必要である。

a. 実効増倍率の不確かさ(初期)

実効増倍率(初期)の不確かさ1、2はそれぞれは約0.4%、0.3%である。(TRU断面積のみによる不確かさ) これは調整炉定数を用いた現状の大型炉設計予測精度(解析誤差を含む)と比べ同程度であり大きい。(例えば、炉定数調整法による電力60万KWe炉心の実効増倍率不確かさは約0.4%である(14)。)これを改善するためには寄与の大きいNp-237やAm-241の捕獲断面積の不確かさを低減する必要がある。

b. 反応度変化の不確かさ

燃焼反応度変化の不確かさ1、2はそれぞれは約13%、約8%である。ノミナル反応度変化は $1.7\% \Delta \rho$ であるので、不確かさ1、2はそれぞれ絶対値約 $0.22\% \Delta \rho$ 、約 $0.14\% \Delta \rho$ である。特に大きなものではないが、現状の大型炉設計予測精度と同程度の大きさである。(炉定数調整法による電力60万KWe炉心の燃焼反応度変化の不確かさは約10%である(14)。)これを改善するためにはNp-237やAm-241の捕獲断面積に加え、Pu-238の核分裂断面積の不確かさを低減する必要がある。

c. 最大出力密度の不確かさ

出力分布(各領域の最大出力密度)の不確かさ1、2は、内側炉心でそれぞれ0.8%、0.5%、外側炉心でそれぞれ0.2%、0.1%と大きくはない。この原因はTRU添加割合が少ないだけでなく、均一に添加されているためである。

d. TRUインベントリ変化の不確かさ

TRU消滅量の不確かさ1、2はそれぞれ約7%、4%とやや大きい。サイクル当たりでは186Kg消滅するので不確かさ1では約15Kgの不確かさとなる。

e. ドップラー係数の不確かさ

ドップラー係数の不確かさは約2%前後と大きくはない。但し、これはTRU装荷によるスペクトル変化への効果をみているのであり、TRU断面積の自己遮蔽因子の温度依存性の不確かさは考慮されていない。

f Naボイド反応度の不確かさ

Naボイド反応度の不確かさも約1%前後と大きくはなく、現状認識されているその他の核種による誤差や解析誤差と比べて小さい。

表 3.3.1 超長寿命炉心の炉心特性の不確かさ(1 σ)

炉心特性	不確かさ1*	不確かさ2**
実効増倍率(初期)	1.36%	0.80%
反応度変化(初期から中期)	71.6%	44.9%
反応度変化(初期から末期)	51.9%	32.9%
出力密度(初期、内側炉心)	6.5%	4.9%
出力密度(初期、外側炉心)	2.3%	1.8%
TRU消滅量	2.4%	1.6%
Naボイド反応度(初期)	2.2%	1.6%

*断面積誤差はエネルギーに関しのみ相関ありのケース

**断面積誤差の相関なしのケース

表3.3.2 超長寿命炉心の炉心特性の不確かさの内訳(1)
(単位%、断面積誤差はエネルギーに関しのみ相関ありのケース)

核種と反応	実効増倍率 (初期)	燃焼反応度 変化(初期か ら中期)	燃焼反応度 変化(初期か ら末期)	最大出力密度 (内側炉心、 初期)	最大出力密度 (外側炉心、 初期)	TRU消減量	Naボイド反 応度(初期)
Np-237 捕獲	0.77	41.5	29.5	2.58	0.82	1.87	1.58
Np-237 核分裂	0.38	14.7	10.4	3.76	1.41	0.41	0.18
Am-241 捕獲	0.88	31.8	21.0	2.17	0.70	1.32	1.28
Am-241 核分裂	0.37	12.3	9.1	3.67	1.34	0.38	0.20
Am-243 捕獲	0.38	13.7	12.4	1.33	0.42	0.49	0.74
Am-243 核分裂	0.14	4.2	2.8	1.36	0.49	0.18	0.06
Cm-244 捕獲	0.07	-	-	-	-	-	-
Cm-244 核分裂	0.16	-	-	-	-	-	-
Pu-238 捕獲	-	17.6	21.6	-	-	-	-
Pu-238 核分裂	-	38.8	23.8	-	-	-	-
合計	1.36	71.6	51.9	6.5	2.3	2.4	2.2

注)空欄は未計算または感度なし

表3.3.3 超長寿命炉心の炉心特性の不確かさの内訳(2)
(単位%、断面積誤差の相関なしのケース)

核種と反応	実効増倍率 (初期)	燃焼反応度 変化(初期か ら中期)	燃焼反応度 変化(初期か ら末期)	最大出力密度 (内側炉心、 初期)	最大出力密度 (外側炉心、 初期)	TRU消滅量	Naボイド反 応度(初期)
Np-237 捕獲	0.50	26.4	18.9	2.00	0.65	1.22	1.09
Np-237 核分裂	0.27	10.5	7.4	2.70	1.02	0.29	0.19
Am-241 捕獲	0.37	19.8	13.1	1.53	0.49	0.87	0.93
Am-241 核分裂	0.29	9.6	7.0	2.87	1.10	0.30	0.21
Am-243 捕獲	0.25	9.0	8.2	0.94	0.29	0.34	0.55
Am-243 核分裂	0.10	3.2	2.1	1.01	0.37	0.13	0.06
Cm-244 捕獲	0.05	-	-	-	-	-	-
Cm-244 核分裂	0.11	-	-	-	-	-	-
Pu-238 捕獲	-	11.1	13.8	-	-	-	-
Pu-238 核分裂	-	22.6	13.8	-	-	-	-
合計	0.79	44.9	32.9	4.9	1.8	1.6	1.6

注)空欄は未計算または感度なし

表 3.3.4 TRU5%-1000MWe炉心の炉心特性の不確かさ(1 σ)

炉心特性	不確かさ1*	不確かさ2**
実効増倍率(初期)	0.43%	0.27%
反応度変化	12.5%	7.7%
出力密度(初期、内側炉心)	0.8%	0.5%
出力密度(初期、外側炉心)	0.2%	0.1%
TRU消滅量	6.6%	4.2%
ドップラー係数(初期)	(2.4%)***	(1.7%)***
Naボイド反応度(初期)	1.3%	1.1%

*断面積誤差はエネルギーに関しのみ相関あり

**断面積誤差の相関なし

***TRU断面積f-table不確かさは考慮していない。

表3.3.5 TRU5%-1000MWe炉心の炉心特性の不確かさの内訳(1)
(単位%、断面積誤差はエネルギーに関しのみ相関ありのケース)

核種と反応	実効増倍率 (初期)	燃焼反応度 変化	最大出力密度 (内側炉心、 初期)	最大出力密度 (外側炉心、 初期)	TRU消滅量	ドップラー 係数(初期)*	Naボイド反 応度(初期)
Np-237 捕獲	0.30	8.08	0.60	0.13	5.98	1.54	0.89
Np-237 核分裂	0.08	0.78	0.08	0.01	0.53	0.21	0.19
Am-241 捕獲	0.23	6.34	0.48	0.11	2.66	1.62	0.91
Am-241 核分裂	0.08	0.49	0.06	0.01	0.41	0.16	0.09
Am-243 捕獲	0.15	2.32	0.30	0.06	0.02	0.80	0.34
Am-243 核分裂	0.03	0.19	0.02	0.00	0.16	0.00	0.15
Cm-244 捕獲	0.03	-	-	-	-	-	-
Cm-244 核分裂	0.03	-	-	-	-	-	-
Pu-238 捕獲	-	2.60	-	-	-	-	-
Pu-238 核分裂	-	6.11	-	-	-	-	-
合計	0.43	12.5	0.83	0.18	6.58	2.39	1.34

注)空欄は未計算(寄与小さい)または感度なし
*TRU断面積f-table不確かさは考慮していない。

表3.3.6 TRU5%-1000MWe炉心の炉心特性の不確かさの内訳(2)
(単位%、断面積誤差の相関なしのケース)

核種と反応	実効増倍率 (初期)	燃焼反応度 変化	最大出力密度 (内側炉心、 初期)	最大出力密度 (外側炉心、 初期)	TRU消滅量	ドップラー 係数(初期)*	Naボイド反 応度(初期)
Np-237 捕獲	0.19	5.11	0.37	0.08	3.78	1.08	0.69
Np-237 核分裂	0.06	0.55	0.06	0.01	0.38	0.16	0.17
Am-241 捕獲	0.14	3.92	0.30	0.07	1.67	1.18	0.69
Am-241 核分裂	0.06	0.39	0.04	0.0	0.31	0.16	0.08
Am-243 捕獲	0.10	1.52	0.18	0.05	0.0	0.56	0.27
Am-243 核分裂	0.02	0.15	0.01	0.0	0.12	0.0	0.10
Cm-244 捕獲	0.02	-	-	-	-	-	-
Cm-244 核分裂	0.02	-	-	-	-	-	-
Pu-238 捕獲	-	1.62	-	-	-	-	-
Pu-238 核分裂	-	3.50	-	-	-	-	-
合計	0.27	7.69	0.51	0.12	4.16	1.71	1.03

注)空欄は未計算(寄与小さい)または感度なし
*TRU断面積f-table不確かさは考慮していない。

3.4 まとめ及び精度を向上すべき断面積の抽出

全節の結果から、超長寿命炉心では実効増倍率・燃焼反応度変化・出力分布の不確かさが、TRU5%大型炉心では実効増倍率・燃焼反応度変化の不確かさが大きく、PuやUの主要核種の不確かさや解析誤差による現状の設計不確かさに比べ同程度かそれよりも大きい。この不確かさを低減するために精度向上が必要な断面積、反応とエネルギー範囲を表3.4.1にまとめた。

この表からわかるように、精度向上のもっとも必要なものはNp-237,Am-241の捕獲断面積、Pu-238の核分裂断面積である。これについて、超長寿命炉心では、Np-237,Am-241の核分裂断面積、Pu-238の捕獲断面積、Am-243の捕獲断面積、TRU5%大型炉心ではNp-237,Am-241の核分裂断面積、Am-243の捕獲断面積が挙げられる。両炉心でNp-237,Am-241の核分裂断面積の重要度が異なるのは、中性子スペクトルの違いによる。即ち、超長寿命炉心ではTRU20%と装荷割合が多くTRU5%大型炉心よりも中性子スペクトルが硬いので、しきい反応であるこれらの断面積の相対的な影響が大きいためである。

TRU消滅量の不確かさはかなり小さい。Naボイド反応度については、TRU断面積の不確かさによる不確かさは小さく、TRU以外の断面積誤差や解析誤差の影響がはるかに大きく、これらを低減することの方が重要である。

尚、炉心特性の不確かさへの寄与は、TRUそれぞれの核種の装荷割合が影響するので、本検討でのTRU組成(軽水炉35GWd/T取り出し)と異なる組成を仮定すると、不確かさへの寄与も異なったものとなる。但し、寄与はおおむね装荷割合に比例して変わると考えて良い。例えば、高速炉取り出しTRUではNpが減りAmの割合が増えるので、不確かさへの寄与も本検討結果に比べてAmの寄与が大きくなる。

表 3.4.1 精度向上に必要な断面積

断面積	エネルギー 範囲	現状の 不確かさ	優先度1 (超長寿命炉心 の設計の観点 から)	優先度2 (5%TRU大型 炉心の設計の 観点から)
Np-237の捕獲断面積	400keV~86keV	20%	1	1
	86keV~9.2keV	10%		
Am-241の捕獲断面積	1.4MeV~400keV	30%	1	1
	400keV~9.2keV	15%		
Pu-238の捕獲断面積	400keV~86keV	30%	2	2
	86keV~9.2keV	20%		
Pu-238の核分裂断面積	10MeV~9.2keV	10%	1	1
Np-237の核分裂断面積	10MeV~400keV	5%	2	3
Am-241の核分裂断面積	10MeV~400keV	7%	2	3
Am-243の捕獲断面積	400keV~86keV	30%	2	2
	86keV~9.2keV	20%		

謝 辞

本報告書の作成にあたっては、株式会社東芝 川島正俊氏、森木保幸氏に多大な御協力を頂いた。特に、計算実行の大部分は両氏によるものである。ここに、厚く感謝の意を表する。

参考文献

1. L.KOCH, Formation and Recycling of Minor Actinides in Nuclear Power Stations, Handbook on the Physics and Chemistry of the Actinides, Chapter 9, North-Holland Physics Publishing, 1986.
2. J.W.WATCHER and A. G. CROFF, Actinide Partitioning - Transmutation Program Final Report III. Transmutation Studies, Oak Ridge National Laboratory report, ORNL/TM-6983, 1980.
3. M.YAMAOKA, et al., Characteristics of TRU Transmutation in an LMFBR, presented at Workshop on the P-T of Minor Actinides, Mito, Ibaraki, Japan, Oct. 16-18, 1990.
4. M.Yamaoka, et al., Feasibility Study of TRU Transmutation by LMFBRs, Proceedings of Int. Conf. on Fast Reactors and Related Fuel Cycles, Vol.III, p5.14, Kyoto, Japan, Oct.28-31,1991.
5. 山岡他、PNC ZN9410 91-365 高速炉によるTRU消滅処理に関する研究(I)、1991年11月。
6. M. KAWASHIMA, et al., Neutronic Feasibility of an LMFBR Super Long-Life Core (SLLC), Nucl., Engng., Design, 106, 1988.
7. 東芝、PNC ZJ9164 92-003 高速炉によるTRU消滅処理計算(その2)、1992年3月。
8. H.TAKANO, et al., JFS3-JENDL3/91-02 : Fast Reactor Group Cross Section Library Based on the JENDL-3 Nuclear Data, to be published at Japan Atomic Energy Research Institute report.
9. R.J.Tuttle, Delayed Neutron Yields in Nuclear Fission, Consultants Meeting on Delayed Neutron Properties, IAEA, Vienna, 1979.
10. M.C.Brady and T.R.England, Nucl.,Sci., Engng.,Vol.103,1989.
- 11.J.Blachot, Proc. Int. Conf. Nuclear Data for Science and Technology, Tulich, 13 May, 1991.
- 12.D.Saphier,et al, Evaluated Dealyed Neutron Spectra and Their Inportance in Reactor Calculations, Nucl.,Sci., Engng.,Vol.62, p660-694, 1977.
- 13.林他、PNC ZN9410 92-137 大型高速炉設計研究成果報告書、1992年5月。
- 14.PNC ZY9471 92-001(1)Vol.1 共同研究報告書 大型炉用修正炉定数に関する研究 (平成3年度)、1992年3月。

付録 100万KWe大型炉心(5%TRU)の炉心仕様と炉心特性

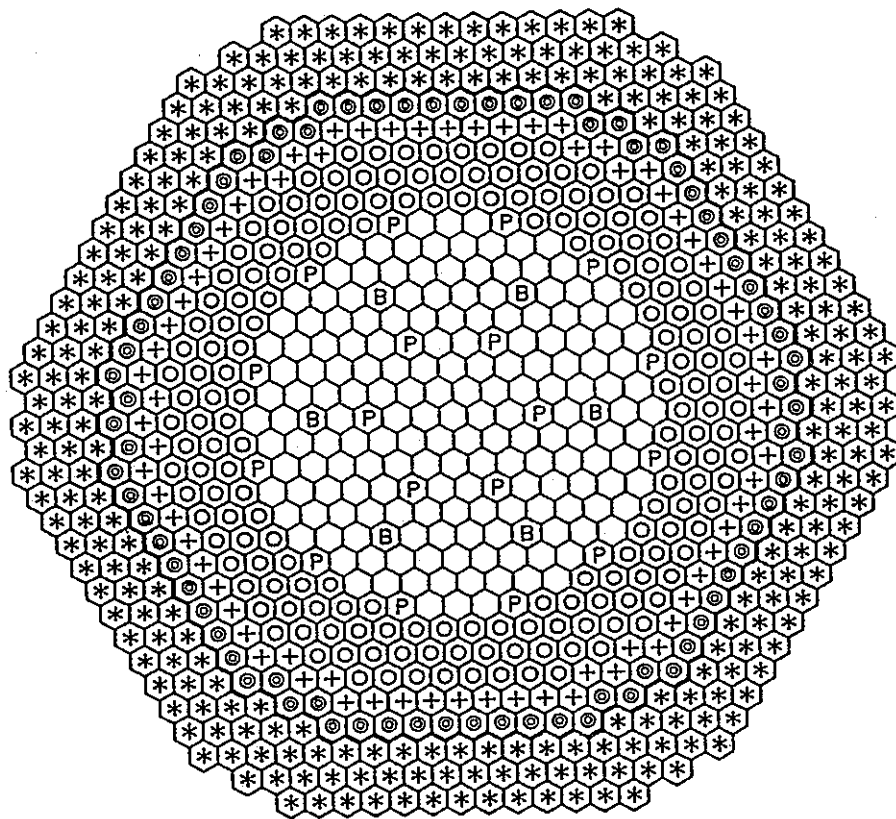
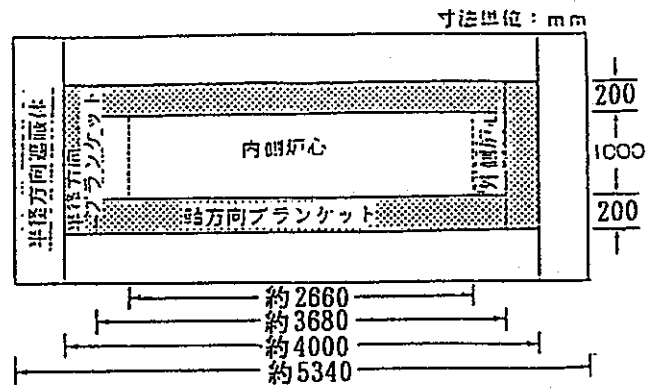
第3章でTRU断面積の不確かさを評価したTRU5%添加100万KWe大型炉心の炉心仕様と炉心特性を示す。

本炉心のベースは1988年設計の動燃大型炉レファレンス炉心*であり、その炉心配置を図A.1.1に、主な仕様と特性を表A.1.1に示す。同表の炉心特性はTRU5%添加の場合のものである。(JENDL-3での解析結果)

*引用文献、PNC SJ2214 89-002(2) 大型炉に関する設計研究に伴う設備設計役務-大型FBRレファレンスプラント-、三菱原子力工業(株)、平成元年6月

表A.1.1 100万KWe大型炉心(5%TRU)の仕様と特性

熱出力	2517MWth
運転サイクル長	456日
集合体数 内側炉心 外側炉心 径ブランケット 主炉停止系制御棒 後備停止系制御棒	175 180 72 18 6
炉心高さ 軸ブランケット厚さ	100cm 上下とも20cm
燃料交換バッチ数 炉心 ブランケット	3 4
燃料体積比 炉心 径ブランケット	(燃料/Gap/構造材/冷却材) 39.6/2.0/20.9/37.5% 54.9/1.8/16.2/27.1%
燃焼反応度変化 TRU消滅量 ドップラー係数(BOEC/EOEC) Naボイド反応度(BOEC/EOEC)	1.7% $\Delta\rho$ 186Kg/サイクル $-4.92/-5.11 \times 10^{-3} \text{Tdk/dT}$ 2.44/2.87% $\Delta\rho$



⊙	179.8 mm	○	内側炉心	175本
⊗	181.2 mm	⊙	外側炉心	180本
		P	主炉停止系制御棒	18本
		B	後備炉停止系制御棒	6本
		+	半径方向ブランケット	72本
		⊙	中性子遮蔽体 (SUS)	78本
		⊗	中性子遮蔽体 (B4C)	270本
			合計	799本

図A.1.1 100万KW炉心の炉心配置図